



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

สายวิชาวิทยาศาสตร์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์จากเถ้าขี้เถ้าเพื่อบำบัดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อม
สิ่งทอม่ออ้อม

Application Zeolite from Bagasse ash for Dyes Removal from MoHom Textile
Wastewater

นามผู้วิจัย นางสาวศรียาภา บุญเพชร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ประภา โชะสลาม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์เรวดี อนุวัฒนา, Ph.D.)

หัวหน้าสายวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนวรรณ พาณิชพัฒน์, ปร.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสืงวิ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์จากเถ้าชานอ้อยเพื่อบำบัดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อส้ม

Application of Zeolite from Bagasse Ash for Dyes Removal from MoHom Textile Wastewater

โดย

นางสาวศรีอาภา บุญเพชร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีสสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศรีอาภา บุญเพชร 2554: การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยเพื่อบำบัดสีข้อมจากโรงงานฟอก
ข้อมสิ่งทอม่อ้อม ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) สาขา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สายวิชาวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ประภา โഴ๊ะสลาม, Ph.D. 121 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่ผลิตจากเถาขานอ้อย เพื่อกำจัดสี
ประเภทสียเบสิก คือ Astrazon blue และ Basic red 46 ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง
เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีประเภทเบสิกในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ มวลซีโอไลต์
ระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นสี พบว่า ในการบำบัดสีเบสิกโดยใช้ซีโอไลต์จากเถา
ขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน ให้ผลไม่แตกต่างกันทางนัยสำคัญ โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้ซีโอไลต์
ปริมาณ 0.5 กรัม ในน้ำที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ระยะเวลา
สัมผัส 30 นาที สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 98.95 และ 98.43 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสี Basic red 46
โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน คือ ปริมาณซีโอไลต์ 0.8 กรัม ในน้ำที่มีความเข้มข้น 20
มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 240 และ 180 นาทีสำหรับซีโอไลต์จาก
เถาขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 89.73 และ 79.23 การดูดซับสีประเภทเบสิกด้วย
ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยเป็นไปตามสมมูลการดูดซับแบบแลงเมียร์ ให้ค่าการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 54.9 และ
15.72 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ สำหรับสี Astrazon blue และ Basic red 46 เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมมา
ประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกข้อมสิ่งทอม่อ้อมแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัด
สีร้อยละ 76.73 และสามารถบำบัดซีโอไลต์ได้ร้อยละ 72.41

ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีสังเคราะห์จากโรงงานฟอกข้อมสิ่งทอม่อ้อม แบบต่อเนื่อง
โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีประเภทเบสิก ได้แก่
ความเข้มข้นสี อัตราการไหล ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ และมวลซีโอไลต์ที่บรรจุในคอลัมน์ พบว่า ป้อนน้ำ
ไหลผ่านคอลัมน์ที่มีมวลซีโอไลต์บรรจุเท่ากับ 42 กรัม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำสี 2 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อัตรา
การไหล 0.9 ลิตรต่อนาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีข้อมร้อยละ 78.77 และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับ
น้ำเสียจริง พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีร้อยละ 58.82 และสามารถบำบัดซีโอไลต์ได้ร้อยละ 86.05

Sriapa Bunpet 2011: Application of Zeolite from Bagasse Ash for Dyes Removal from MoHom Textile Wastewater. Master of Science (Environmental Science and Technology), Major Field: Environmental Science and Technology, Division of Science. Thesis Advisor: Miss Prapa Sohsalam, Ph.D. 121 pages.

This work studied on the efficiency of zeolite from bagasse ash for dyes removal of Astrazon blue and Basic red 46 from synthetic wastewater by batch adsorption. The effect of operating condition such as sorbent dosage of zeolite bagasse ash, contact time, pH and concentration of dyes in synthetic wastewater were observed. The result showed that Astrazon blue removal by using zeolite from bagasse ash and standard zeolite were not different significantly. The optimum conditions of zeolite from bagasse ash and standard zeolite of 0.5 g in the synthetic wastewater of 20 mg/l of basic dye at pH of 5 could be reached to equilibrium within 30 minutes. Percentage of Astrazon blue removal by using zeolite from bagasse ash and standard zeolite were 98.95 and 98.43. The optimum conditions of basic red 46 adsorption for zeolite from bagasse ash and standard zeolite was 0.8 g in 20 mg/l of basic dye wastewater at pH 5. At this condition could be reached to equilibrium within 240 and 180 minutes for zeolite from bagasse ash and standard zeolite. Percentage of Basic red 46 removal by using zeolite from bagasse ash and standard zeolite were 89.73% and 79.23% The adsorption isotherms of Astrazon blue and Basic red 46 fitted well with Langmuir equation at the maximum sorption capacities were 54.9 and 15.72 mg/g of zeolite. The efficiency of dye removal and COD removal of zeolite from bagasse ash by batch experimental were 76.73% and 72.41%

Continuous adsorption was investigated for basic dyes removal from MoHom textile wastewater. The effect of operating condition such as concentration of dyes, flow rate, Hydraulic Retention Time and sorbent dosage in fixed bed column were investigated. The result showed that the optimum condition of the fixed bed reactor was 42 g of zeolite from bagasse ash and concentration of dyes 2 mg/l through column fixed bed at flow rated of 0.9 l/hr. Percentage of basic dyes removal was 78.77%. The efficiency of dye removal and COD removal of zeolite from bagasse ash by continuous experimental were 56.97% and 86.05%

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ประภา โഴ๊ะสลาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.เรวดี อนุวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้แนวคิด คำแนะนำในด้านการเรียนและการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุติยา แซ่ปึง ประธานการสอบ และดร. ทศนิ์ ต้นดี ผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ข้อมูลและความรู้ต่างๆ ในการศึกษา

ขอขอบคุณทุนภาคีบัณฑิตและฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการและให้สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนๆทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนงานวิจัยนี้ ท้ายสุดนี้ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความดีและก่อให้เกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม ผู้วิจัยขอมอบความดีทั้งปวง ให้แก่บิดา มารดา ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้มีความรู้ความสามารถและประสบความสำเร็จในการศึกษา

ศรีอาภา บุญเพชร
เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ในการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	46
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	85
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	101
ภาคผนวก จ	107
ภาคผนวก ฉ	111
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประเภทของสีย้อม	14
2	คุณสมบัติของซีโอไลต์ เอ	33
3	รายการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์	54
4	ค่าคงที่ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแสงเมียร์ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดิชและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวของสีย้อมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถาขานอ้อยแบบผง	62
5	ค่าคงที่ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแสงเมียร์ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวของสีย้อมโดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐานทางการค้าแบบผง	62
6	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยวิธีการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงและวิธี S.U. ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง	68
7	ผลของประสิทธิภาพในการดูดซับสีจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมืออ้อมในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และ แบบต่อเนื่อง (Continuous Test)	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่ออ้อมในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยวิธีเอสยู	82
ก2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่ออ้อมในระบบแบบต่อเนื่อง โดยวิธีเอสยู	82
ข1 น้ำทิ้งที่เสนอแนะสำหรับโรงงานฟอกย้อม ที่ระบายลงสู่แหล่งสาธารณะ	86
ค1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon Blue โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ	92
ค2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon blue โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	92
ค3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon blue โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ	93
ค4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon blue โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10	94
ค5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ	94
ค6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	95
ค7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ	96
ค8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10	96
ค9 ปริมาณสีย้อม Astrazon blue ในน้ำสีสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยแบบผง	97
ค10 ปริมาณของสีย้อม Basic red 46 ในน้ำสีย้อมสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยแบบผง	98
ค11 ปริมาณของสี Astrazon blue ในน้ำสีย้อมสังเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์มาตรฐานชนิด A แบบผง	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค12 ปริมาณของสี Basic Red 46 ในน้ำสีข้อมส้เกราะห้เมื่อถูกดูดคิดพิวด้วยซีโอดีแบบผง	100
ง1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยใช้ปริมาณซีโอดีมาตรฐาน 4 A ที่ปริมาณต่างๆ	102
ง2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	102
ง3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยใช้ความเข้มข้นสีข้อมต่างๆ	103
ง4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10	104
ง5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Basic red 46 โดยใช้ปริมาณซีโอดีมาตรฐาน 4 A ที่ปริมาณต่างๆ	104
ง6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	105
ง7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Astrazon blue โดยใช้ความเข้มข้นสีข้อมต่างๆ	106
ง8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Basic red 46 โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10	106
จ1 ประสิทธิภาพความเข้มข้นของสีข้อมในระบบแบบต่อเนื่อง	108
จ2 ประสิทธิภาพอัตราการไหลในระบบแบบต่อเนื่อง	108
จ3 ประสิทธิภาพการใช้เวลาในการเก็บกักน้ำในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง	109
จ4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลซีโอดีบรรจุในคอลัมน์ เท่ากับ 28 กรัม ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ5	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลของซีโอไลต์บรรจุในคอลัมน์ เท่ากับ 42 กรัม ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง 110
จ6	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลของซีโอไลต์บรรจุในคอลัมน์ เท่ากับ 56 กรัม ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง 110
ฉ1	ผลของปริมาณวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และ สี Basic red46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 112
ฉ2	ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และ สี Basic red46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 114
ฉ3	ผลของความเข้มข้นของสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และ สี Basic Red46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 116
ฉ4	ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และ สี Basic red46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 118
ฉ5	ผลของค่าร้อยละในการเจือจางต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 119
ฉ6	ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 119
ฉ7	ผลของเวลาในการกักเก็บน้ำสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 120
ฉ8	ผลของมวลของซีโอไลต์ที่บรรจุในคอลัมน์และระยะเวลาการกักเก็บน้ำสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.) 120

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	CI disperse blue 24	8
2	CI Acid Blue 45	8
3	CI Diazo 32 และ CI Coupling 4	9
4	Astrazon blue FGGL 300%	9
5	CI direct yellow 8	10
6	CI mordent Green 4	11
7	CI Sulfur Brown 61	11
8	CI Vat Black 1	12
9	CI Reactive blue	13
10	Metallic phenolic dyes	13
11	รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซัลฟอนหรืออะลูมิเนียม ในหน่วยเล็ก ๆ ของซีโอไลต์ (Sub unit) ของซีโอไลต์	25
12	โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิเนียมซิลิเกต	26
13	โครงสร้างของซีโอไลต์เอ	31
14	ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์	32
15	ชานอ้อย	35
16	ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir	40
17	ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich	41
18	ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากสถานะกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	46
19	คอลัมน์แบบจำลองและคอลัมน์จริงที่ใช้ในการศึกษา	51
20	แผนภาพแสดงการทดลองในการทดลองที่ 3	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง	55
22	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)	56
23	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีข้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)	57
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)	58
25	ไอโซเทอมในการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ของสี Astrazon blue	60
26	ไอโซเทอมในการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ของสี Astrazon blue	60
27	ไอโซเทอมในการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ของสี Basic red 46	61
28	ไอโซเทอมในการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ของสี Basic red 46	61
29	ความเข้มข้นของสีข้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม	64
30	(ก1) น้ำสีข้อมความเข้มข้น 1 มก./ล. (ก2) น้ำสีที่ผ่านคอลัมน์ (ข1) น้ำสีข้อมความเข้มข้น 2 มก./ล. และ (ข2) น้ำสีที่ผ่านคอลัมน์	65
31	อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี	65
32	ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม	66
33	ประสิทธิภาพในการบำบัดสีกับมวลของซีโอไลต์อัดเม็ดที่บรรจุในคอลัมน์ที่มวลต่างกัน	67
34	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงและเวลาในการกักเก็บน้ำหลังจากผ่านคอลัมน์	70
35	น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมม่อฮ่อมและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในระบบแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 การวัดสีโดยใช้วิธี Space Unit (S.U.)	80
ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีและค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของ สี Astrazon blue FGGL 300%	83
ก3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีและค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของ สี Basic red 46	83
ก4 การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีผลต่อสีข้อมในการทดลอง (ก) น้ำสี สังเคราะห์ Astrazon blue ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 2-10 และ (ข) น้ำสี สังเคราะห์ Basic red 46 ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 2-10	84

การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยเพื่อบำบัดสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ม่อฮ่อม

Application of Zeolite from Bagasse Ash for Dyes Removal from MoHom Textile Wastewater

คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมประจำปี 2551 พบว่าเฉพาะในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมีอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอประมาณ 430 แห่ง (อานนท์ และ เกศณี, 2551) โดยอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอนการผลิต มีการใช้สีย้อมเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต โดยส่วนใหญ่ใช้สีย้อมประเภท เบสิก อะโซอิก และรีแอกทีฟ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมี พบว่าสีเหล่านี้ยากต่อการย่อยสลายในทางชีววิทยา เนื่องจากมีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีองค์ประกอบของโลหะหนักปนอยู่ ส่งผลต่อการคัดเลือกกระบวนการบำบัดสีย้อมที่มีประสิทธิภาพ ทำให้มีการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้มาตรฐานสู่สิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมผลิตผ้าม่อฮ่อมจัดเป็นโรงงานขนาดเล็ก และเป็นกลุ่มงานระดับชุมชนที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่ดีพอ โดยพบว่าขั้นตอนการผลิตผ้าม่อฮ่อมต่อ 10 ชิ้น เกิดน้ำเสียจากการผลิตมากถึง 30 ลิตร (วชิรพงศ์, 2549) น้ำเสียประเภทผ้าม่อฮ่อมจึงเป็นน้ำเสียประเภทหนึ่งที่ต้องได้รับการดูแลและหาแนวทางในการบำบัด เพื่อลดการปนเปื้อนน้ำทิ้งเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ในปัจจุบันมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยวิธีการต่างๆ เช่น การตกตะกอน แต่มีข้อเสียคือ ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นต้น (ธงชัย, 2544) วิธีการทางชีวภาพเป็นวิธีการบำบัดที่มี

ประสิทธิภาพ แต่มีข้อเสียคือในกระบวนการบำบัดอาจจะต้องใช้เวลานาน เป็นต้น (Abraham, 1996)

การกำจัดสีโดยใช้วิธีการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ โดยวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์นั้นมีราคาสูง ทำให้ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร ซีโอไลต์จึงเป็นวัสดุดูดซับอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีราคาค่าและสามารถกำจัดโลหะหนักและนำโลหะหนักเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ได้ โดยทั่วไปซีโอไลต์มี 2 ประเภท ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยซีโอไลต์ธรรมชาติไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร เนื่องจากโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ในปัจจุบันมีการนำซีโอไลต์สังเคราะห์เข้ามามีบทบาทต่อการใช้งานในปัจจุบันมากขึ้น และจากการศึกษาวัตถุดิบเริ่มต้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ผลิตจากของเสียต่างๆ ได้แก่ แกลบ (Nur, 2001) ตะกรันเหล็ก (เรวดี, 2544) ขี้เถ้าลอย (Lin, 1995) เป็นต้น ถ้ำซานฮวยจัดเป็นของเสียเหลือทิ้งอีกประเภทหนึ่งจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น ซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตซีโอไลต์ และนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงสารประกอบซีโอไลต์ เพื่อการกำจัดสีฟอกย้อมสิ่งทอ โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากอุตสาหกรรม คือ ถ้ำซานฮวยมาเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาค่า และหาได้ง่าย เหมาะสำหรับประเทศกำลังพัฒนา และทำการศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์จากถ้ำซานฮวยในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียโดยมุ่งเน้นถึงชนิดของน้ำเสียที่ได้จากโรงงานผลิตผ้าผ้าม่อฮ่อม โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ เวลา ปริมาณตัวดูดซับ ซีโอไลต์ ความเข้มข้นของสีย้อม ค่าความเป็นกรด-ด่างในห้องปฏิบัติการแบบไม่ต่อเนื่องและทำการศึกษาการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์เป็นแบบจำลองศึกษาในปัจจุบันต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของสีย้อม อัตราการไหล ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ และมวลของซีโอไลต์ที่ใช้ในการดูดซับ เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอแบบอื่นๆ ที่มีการใช้สีย้อมประเภทเบสิก สามารถนำมาพัฒนาและปรับปรุงระบบบำบัดในอนาคต

วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีเบสิกในน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อย ได้แก่ ปริมาณซีโอไลต์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำสีสังเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส (contact time) และความเข้มข้นในน้ำสีสังเคราะห์โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง
2. ศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยเพื่อใช้ในระบบบำบัด โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสีย้อม อัตราการไหลของน้ำในระบบ ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ และมวลของซีโอไลต์ที่ใช้ในการดูดซับ
3. ศึกษาการกำจัดสีและซีโอตินในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมืออ้อม

การตรวจเอกสาร

1. การฟอกย้อมสี

1.1 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบที่ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรงหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณภาพของเส้นใยโดยใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

กรรมวิธีในการย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมในหม้อย้อมแบบครั้งคราว และย้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องย้อม การย้อมแบบครั้งคราวนั้นให้ปริมาณน้ำเสียน้อยแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนเครื่องย้อมแบบต่อเนื่อง ให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากกรรมวิธีการย้อมแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทางด้านตัวสีย้อม สารช่วยย้อม และความสามารถติดสีบนเนื้อผ้า เป็นต้น จึงทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่ติดมากับน้ำย้อมแตกต่างกัน การย้อมที่มีประสิทธิภาพ คือ การย้อมให้ผ้ามีสีสม่ำเสมอเท่ากันตลอด สีย้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดออกโดยง่าย

อุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบไปด้วยกระบวนการหลักๆ ดังนี้

1.1.1 การเตรียมผ้า (preparation)

เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความขาวและมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี อันจะทำให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จที่ตามมาสามารถดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด สามารถประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้ลงได้ สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมสิ่งทอ มีอยู่หลายประการที่สำคัญดังนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2544)

1) การเผาขน (singeing)

ในเส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่า เส้นด้ายสะปันนั้น มักจะมีปลายเส้นใย โผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายนั้นถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายก็จะมีมากขึ้น ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวเส้นด้ายก็จะมีมากขึ้น เป็นการทำความงามนของผ้า จึงได้มีความคิดวิธีการกำจัดปลายเส้นใยดังกล่าวนี้เสีย ด้วยการใช้ความร้อนเผาทำลาย กระบวนการนี้จึงมีชื่อเรียกว่า การเผาขน

2) การลอกแป้ง (desizing)

การลอกแป้ง เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับผ้าทอ เนื่องจากในการทอ จะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายขึ้น เพื่อให้การทอดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่เมื่อนำผ้ามาทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย การลอกแป้งทำให้ผ้ามีคุณสมบัติในการเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอ อันจะช่วยทำให้การตกแต่งผ้าในขั้นตอนต่อไป เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สามารถประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้

3) การขจัดสิ่งสกปรก (scouring)

การขจัดสิ่งสกปรก หมายถึง การกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมาด้วยเสมอไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติ หรือสิ่งที่ติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งเหล่านี้จะต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซดาไฟ น้ำสบู สารจับโลหะ เป็นต้น

4) การฟอกขาว (bleaching)

การฟอกขาว หมายถึง การกำจัดสารเคมีสีธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น สารที่ใช้ในการฟอกขาวมีหลายชนิด ซึ่งสารเหล่านี้จะมีลักษณะในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโปคลอไรท์ คลอไรท์ เป็นต้น

5) การชุบมัน (mercerization)

โดยที่นำผ้าฝ้ายไปผ่านสารละลายความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง การชุบมันนอกจากจะกระทำกับผ้าฝ้ายแล้วยังสามารถกระทำกับผ้าจากเส้นใยผสม การชุบมันจะไปช่วยสกัดจีฟี่งและไขมันในฝ้ายออกและทำให้เส้นใยฝ้ายพองตัว มีความสามารถดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น

1.2 สีย้อม

สีย้อมมีหลายชนิด การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมียานมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสถานะนี้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดการดึงดูดกับเส้นใยได้คือ

- ไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)
- แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal's forces)
- แรงไอออน (ionic forces)
- โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

แรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond) นอกจากอิทธิพลของแรงทั้ง 4 ชนิดนี้แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้าง ความยาวมากๆ จะทำให้การติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

สรุปได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและฟิสิกส์ โดยมีสารบางอย่างเข้าช่วยเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้น สารบางอย่างนี้คือสารช่วยย้อม (additive)

1.2.1 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อม คือสารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทนและสม่ำเสมอ (อัญญาพร, 2519)

สารช่วยย้อมแบ่งเป็น 7 ประเภท คือ

- 1) กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และในล่อนเมื่อใช้ย้อมแอลิด
- 2) ด่าง ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก แวตและกำมะถัน
- 3) เกลือใช้ในการย้อมด้วยสีแอลิด และการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- 4) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวต
- 5) สารนำ (carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 7) สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

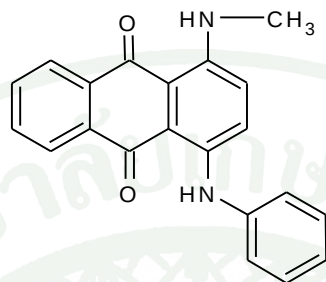
1.2.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานทอผ้ามีมากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อมสีย้อม อาจจำแนกได้หลายประเภท ตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็นสารสีละลายในน้ำได้และสารสีที่ไม่ละลายในน้ำ หรือจำแนกส่วนประกอบทางเคมี และสูตรโครงสร้างของสีย้อม วิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่าย ได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท

1) สีดีสเพิร์ส (disperse dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายในน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (disperse agent) ที่เหมาะสม จะสามารถย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกเสียจากสารพา (carrier) บางตัวที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

สีคิสมิแยร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีเชื่อม ได้แก่ สีเอโซ (azo dyes) และสีเชื่อม amino anthraquinone ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติจะประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของ ethanolamine-NH₂CH₂CH₂OH หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

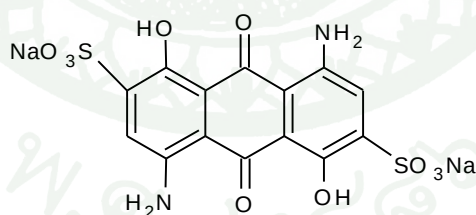


ภาพที่ 1 CI disperse blue 24

ที่มา: Vigo (1994)

2) สีแอซิด (acid dyes)

ใช้เชื่อมเส้นใยโปรตีนในน้ำเชื่อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้เชื่อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีสเตออร์ เป็นต้น ตัวสีเชื่อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

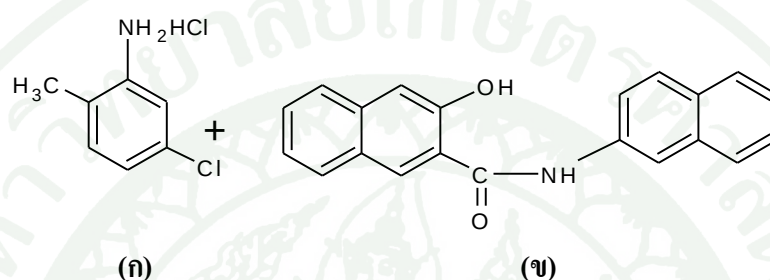


ภาพที่ 2 CI Acid Blue 45

ที่มา: Vigo (1994)

3) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นสีที่จะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า คัปปลิง (coupling)

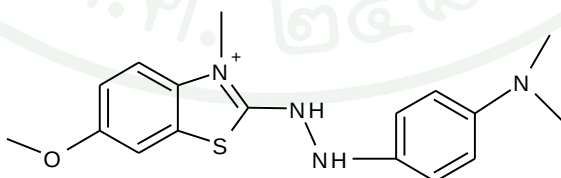


ภาพที่ 3 CI Diazo 32 (ก) และ CI Coupling 4 (ข)

ที่มา: Vigo (1994)

4) สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromofore) ให้แคตไอออนทำให้เรียกสั้นๆ ว่า สีแคตไอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย



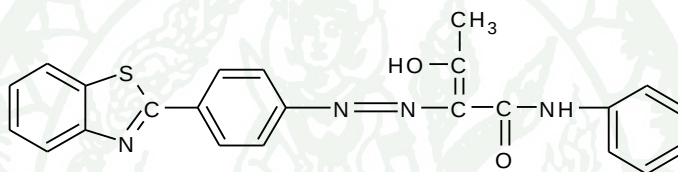
ภาพที่ 4 Astrazon blue FGGL 300%

ที่มา: Vigo (1994)

5) สีย้อมไคเรคต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดเส้นใยฝ้ายได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือเข้าช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสียละลายน้ำได้

สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทนตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิต และราคาจำหน่ายย่อมสูงขึ้นด้วย

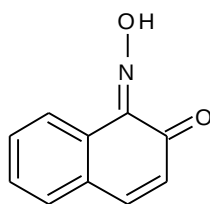


ภาพที่ 5 CI direct yellow 8

ที่มา: Vigo (1994)

6) สีย้อมเมอแดนท์ (mordant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเอลิดที่สามารถก่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ แล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ (wet fastness) ได้ดีกว่าไม่ย้อมทับ

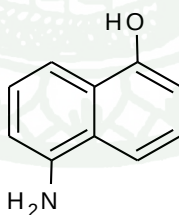


ภาพที่ 6 CI mordent Green 4

ที่มา: Vigo (1994)

7) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูก แต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าเป็นสีย้อมซัลเฟอร์เพราะว่า สารที่นำมารีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ และโคโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มธาตูละออง (sulforenic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้ว จะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดซ์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ



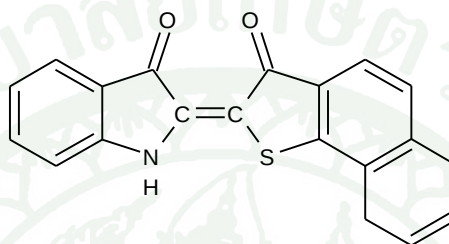
ภาพที่ 7 CI Sulfur Brown 61

ที่มา: Vigo (1994)

8) สีย้อมแวต (vat dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้

สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาละลาย ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ สีข้อมเมื่อถูกรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดซ์กลับคืนสภาพเป็นสีแควดที่ไม่ละลายน้ำทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี สีข้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)

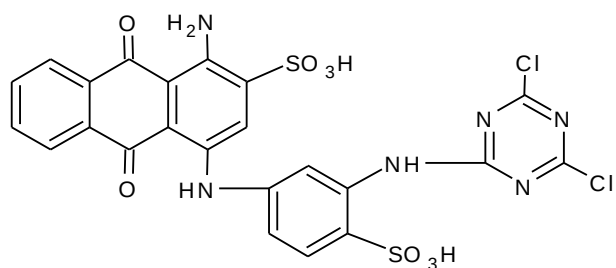


ภาพที่ 8 CI Vat Black 1 (CI 73670)

ที่มา: Vigo (1994)

9) สีข้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)

ใช้ข้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้คุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำข้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สมบัติการละลายและดูดซับเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดกับเส้นใย

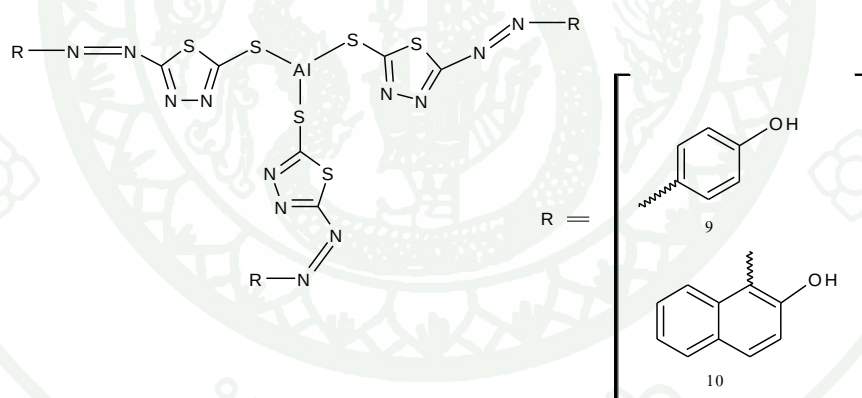


ภาพที่ 9 CI Reactive blue

ที่มา: Vigo (1994)

10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้เชื่อมเส้นใยเซลลูโลส และให้สีต่างๆกัน เมื่อเชื่อมแล้วต้องทำให้สารนี้ยึดจับตัวในเส้นใย



ภาพที่ 10 Metallic phenolic dyes

ที่มา: Vigo (1994)

11) สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้ รูปแบบการย้อมค่านินคล้ายสีย้อมแอซิด คือต้องทำให้สีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน (วิไลพร, 2536) สามารถสรุปประเภทของสีย้อมได้โดยแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของสีย้อม

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพ	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
แอซิด (acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีดัดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
เมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (metal complex)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีดัดแน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - สมมติว่าเส้นใยมีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
ไดเรกต์ (direct dye)	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีดัดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แช่ในสารละลายด่างอ่อน - เดิมอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟตและสีย้อม ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส
มอแดนท์หรือโครม (mordant or chrome)	- กระจุก - ละลายน้ำได้ดี - สีดัดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะเชิงซ้อนของเส้นใยโครมและสีย้อม	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมโซเดียมไดโครเมต เดิมสีย้อมเพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพ	เส้นใยที่เหมาะสม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
ดิสเพอร์ส (disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก - สีติดแน่น	- โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - อะคริลิก - เซลลูโลส	- เนื่องจากเป็นคอลลอยด์จึงเป็นการดูดติดผิวที่เส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิถึง 130 องศาเซลเซียส
รีแอกทีฟ (reactive acid)	- กระจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่น	- ขนสัตว์	- พันธะโควาเลนต์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีไปสู่เส้นใย - หลังจากนั้นเติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยกับสีย้อม
อะโซอิก (azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายสีไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
แวล (vat dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- เกิดการตกผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียมซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่กระจายสีไปสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์

ที่มา: Buckley (1992)

1.3 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

1.3.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม พิมพ์ และ ตักแต่งเสร็จ น้ำส่วนใหญ่ที่ถูกปล่อยออกมาจะเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีความเข้มข้นของสีสูง
- น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังจากการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อน้ำ จะได้น้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

3) น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาด และสิ่งสกปรกต่างๆ เช่นน้ำมันจากเครื่องจักรในโรงงาน ดิน ทราย เป็นต้น (จารุทัศน์, 2537)

1.3.2 ประเภทสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำทิ้ง

1) สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วน ที่เหลือยังคงอยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยรวมออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีที่ยังเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทสีย้อมที่ใช้

2) สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้มีอยู่หลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่คงเหลืออยู่ในน้ำย้อม จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสารที่ใช้

3) เศษเส้นใย เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงาน อาจเป็นเส้นใยจากธรรมชาติ หรือเส้นใยสังเคราะห์ (ศิริอุมา, 2541)

1.3.3 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเป็นดังนี้

- 1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สี ย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้ว สารอินทรีย์อาจเกิดจากสบู่ ไขมัน ซึ่งจะเป็นฝัากลุ่มผิวหน้า และสารทำความสะอาดที่มีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นี้มีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร (จารุทัศน์, 2537)
- 2) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และสภาพด่าง (alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัม หินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ให้น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต
- 3) มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส
- 4) มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ
- 5) มีความขุ่นสีสูง โดยเป็นสีที่ใช้ย้อมผ้า
- 6) มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้วได้แก่ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี
- 7) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

1.4 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำธรรมชาติต่อไปนี

1.4.1 สารอินทรีย์

1) ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลงซึ่งมีผลทำให้

- สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน
- ทำให้แหล่งน้ำขาดสมบัติในการทำความสะอาดด้วยตัวเองได้
- ทำให้เกิดกลิ่น
- ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

2) สารอินทรีย์บางตัวอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตซึ่งมีผลทำให้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- หากสารนั้นสลายตัวได้ยากจะเกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ
- เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์
 - : ได้รับสารโดยตรงหากบริโภคสัตว์น้ำที่มีสารพิษเข้าไป
 - : ได้รับทางอ้อมจากห่วงโซ่อาหาร หรือจากการที่สารสะสมในระบบนิเวศ

1.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างจะให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลางช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.0-9.0

1.4.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำเสียที่สูง จะมีผลทำให้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- ทำให้ออกซิเจนที่อยู่ในน้ำลดลง
- เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

1.4.4 ของแข็งที่ละลายน้ำ (dissolved solid)

- ของแข็งที่ละลายน้ำได้บางตัวจะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นโรคได้
- ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

1.4.5 สี (color)

- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

1.4.6 โลหะหนัก

- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้
- โลหะหนักจะเป็นสารที่สะสมในระบบนิเวศ
- เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

1.4.7 ของแข็งแขวนลอย (suspended solids)

- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ
- สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้
- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

1.5 การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากการข้อมผ้า

สีข้อมในน้ำเสียจากการข้อมผ้าสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี หรือชีววิทยา ความพยายามที่จะกำจัดสีข้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไปหรือให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุดได้ถูกคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีที่มีการศึกษาวิจัยและรวบรวมไว้เป็นเอกสารที่ปรากฏอยู่มีดังต่อไปนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2544)

1.5.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน (Coagulant) ซึ่งได้แก่สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารโพลิอเล็กโทรไลต์ เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ขั้นตอนที่สองคือ การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆกับการสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้าๆ เพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็กๆเหล่านั้น การหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้จำเป็นต้องทำการทดลอง ซึ่งนิยมเรียกว่า จาร์เทสต์ (Jar Test) โดยในการทดลองจะมีทั้งการกวนเร็ว ตามด้วยการกวนช้า

ในกระบวนการกำจัดสีข้อมด้วยโคแอกกูเลชันนั้น มีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกหลายชนิด การนำสารสร้างตะกอนชนิดใดไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัสดุประสงค์ และอื่นๆ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีโรงงานฟอกข้อมด้วยวิธีโคแอกกูเลชันมีดังนี้

- ในปี 1988 โรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งซึ่งผลิตไหมพรมถักจากฝ้าย และอะคริลิกไฟเบอร์เพื่อทำชุดกีฬา และระบายน้ำเสียลงในเมืองมาร์ตินสวิลล์ รัฐเวอร์จิเนียได้ว่าจ้าง Applied Technology and Engineering, P.C. ให้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสีโดยวิธีโคแอกกูเลชัน และการบ่อนแอคซอพชั่น สีที่ใช้ในโรงงานเป็นสีเบสิก สีรีแอคทีฟ สีไโดเร็กซ์ และสีซัลเฟอร์ การทดลองโดยใช้สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ และโพลิเมอร์ไอออนบวก เป็นเคมีช่วยตกตะกอนโดยมีเป้าหมายในการลดสีในน้ำสุดท้ายให้ต่ำกว่า 200 ADMI แต่ผลการทดลองไม่สามารถลดสีให้เป็นไปตามที่ตั้งไว้ จึงสรุปว่าโคแอกกูเลชันไม่สามารถลดสีลงให้ต่ำกว่า 200 ADMI ได้อย่างต่อเนื่อง

- The instate of Textile Technology (ITT) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกำจัดสีสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยได้ทำการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพของสารเคมีช่วยตกตะกอนในการโคแอกกูเลชันที่สามารถใช้ในการกำจัดสี สารเคมีที่ทดลองใช้ได้แก่ สารส้ม เพอร์คลอไรด์ ปูนขาว และโพลิเมอร์ทั้งชนิดบวก ประจุลบ และไม่มีประจุ พบว่าหากใช้สิดิสเพิร์สสีน้ำเงินในความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลอง สีจะสามารถลดลงมากถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้ปูนขาว สารส้ม และเพอร์คลอไรด์เป็นเคมีช่วยตกตะกอน แต่เพอร์คลอไรด์ไม่สามารถลดสีลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการเติมโพลิเมอร์นั้นสามารถช่วยในเรื่องของการตกตะกอนแต่ไม่ช่วยกำจัดสีเพิ่มเติม

1.5.2 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาจับและติดบนผิว โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูด (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดติด (adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่มีโมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นผิวของอีกสารหนึ่งว่า การดูดติดผิว (adsorption) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดติดผิวมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- 1) ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone Char) แอคติเวทเต็ดซิลิกา ฯลฯ สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิว 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม
- 2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอินทรีย์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญคือ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม จึงจัดแยกไว้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุมีพื้นที่ผิว 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

โดยทั่วไปกระบวนการดูดติดผิวในกระบวนการกำจัดสีและกลั่นน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียจะนิยมถ่านกัมมันต์ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีความสามารถในการ

การดูดซับผิวสูงตามไปด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีการดูดซับผิวมีดังนี้

- The institute of Textile Technology (ITT) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเทคโนโลยีการกำจัดสีสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่งซึ่งใช้ผงถ่านกัมมันต์ หรือ PACT (Powdered Activated Carbon Treatment) พบว่าสามารถกำจัดสีจากช่วง 300-500 APHA ลดลงเหลือประมาณ 40 APHA ส่วนระบบบำบัดน้ำเสียแห่งหนึ่งซึ่งใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (activated sludge) แล้วตามด้วย granular carbon สามารถกำจัดสีจาก 350-990 APHA ลงเหลือ 12 ถึง 60 APHA ภายหลังการบำบัดด้วยคาร์บอน

- วิวรรณ (2539) ได้ทำการทดลองเรื่อง การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้ายโดยศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการใช้ถังกรองซึ่งมีถ่านกัมมันต์ และขี้เถ้าเป็นสารดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพในการลดสีโอดี ผลการทดลองกับสารละลายสีสังเคราะห์ 4 ประเภท ได้แก่ สีแอสิด สีเบสิก สีรีแอคทีฟ และสีไดเรกต์ พบว่า สีที่ถูกซับด้วยถ่านกัมมันต์ ดีที่สุด คือ สีเบสิก รองลงมาคือ สีไดเรกต์ สีรีแอคทีฟ และสีแอสิดตามลำดับตามลำดับ ส่วนสีที่ถูกดูดซับด้วยขี้เถ้าได้ดีที่สุด คือ สีเบสิก รองลงมาคือ สีแอสิด สีไดเรกต์ และสีรีแอคทีฟ ตามลำดับ

1.5.3 คลอรีเนชัน (chlorination)

คลอรีเนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซิงสูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซ คลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีคลอรีเนชันมีดังนี้

- ในปี 1986 บทความเรื่องการกำจัดสีในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้กล่าวถึงวิธีคลอรีเนชันว่าง่ายต่อการเดินระบบ ลงทุนต่ำ และเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ อีกทั้งไม่มีตะกอนซึ่งต้องนำไปเผาหรือฝัง ในทางตรงกันข้ามผลเสียของวิธีคลอรีเนชัน ได้แก่ การเกิดคลอรีเนตเตดไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เกิดกลิ่นและปัญหาคือความเป็นพิษ การใช้ก๊าซคลอรีนในการกำจัดสี

แนะนำให้ใช้ในระบบน้ำเสียขนาดใหญ่ และอัตราการใช้ 100-250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงระยะเวลาสัมผัสสั้นๆ 2-3 นาที ก็เพียงพอที่จะกำจัดสีในอัตราที่น่าพอใจ

- ในปี 1988 Hydrosience, Inc. ได้ทำการศึกษาทดลองในระดับ Pilot Scale ในเมืองมาร์ตินสวิลล์ รัฐเวอร์จิเนีย ถึงความสามารถในการกำจัดสีของคลอรีน โดยน้ำเสียร้อยละ 25 มาจากชุมชน และร้อยละ 75 มาจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม สีที่ใช้ ได้แก่ สีเบสิก สีรีแอคทีฟ สีไดเรกต์ และสีซัลเฟอร์ ผลการศึกษาพบว่าการใช้คลอรีน 62-95 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบรรลุเป้าหมายที่วางไว้เบื้องต้น คือสามารถลดสีลงเหลือ 200 ADMI ผลการทดลองได้แนะนำให้ปรับความเป็นกรด-ด่าง ก่อนนำคลอรีนขึ้นให้อยู่ในช่วง 6.2-6.5 และใช้เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง

1.5.4 โอโซนเนชัน (ozonation)

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซิง เอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทั้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซิงสูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า การผลิตโอโซนกระทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ อะตอมของออกซิเจนจะถูกบังคับให้จับตัวกันใหม่กลายเป็นโอโซน (O_3) อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือเท่ากับร้อยละ 1.4 โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้แต่นิยมใช้ในรูปแบบก๊าซมากกว่า โอโซนเป็นก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดความระคายเคืองรุนแรง คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 PPM โดยปริมาตรโดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าให้คนดมโอโซนเข้มข้นร้อยละ 1 (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีโรงงานฟอกย้อมด้วยวิธีโอโซนเนชันมีดังนี้

- Koottatep (1993) ได้ทำการทดลองใช้โอโซนกำจัดสีย้อมในระดับห้องปฏิบัติการกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าสามารถกำจัดสีได้ประสิทธิภาพร้อยละ 50 โดยใช้การออกซิไดซิงสีย้อมด้วยโอโซน การกำจัดสีด้วยโอโซนดังกล่าว เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ เพราะโอโซนช่วยให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นเป็นประโยชน์ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังเดิมอากาศ และไม่ต้องการถังตกตะกอนขั้นปฐมภูมิ เพราะการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยโอโซนไม่ก่อให้เกิดตะกอนแต่อย่างใด

1.5.5 เทคโนโลยีการใช้แผ่นเมมเบรน (membrane filtration)

เทคโนโลยีของการใช้แผ่นเมมเบรนประกอบด้วยวิธี ultrafiltration และ reverse osmosis v-ultrafiltration หลักการทำงานของระบบคือใช้แผ่นเยื่อกระดาษ (membrane) แบบพอร์สพวกเซลลูโลสอะซิเตด หรือโพลีเมอร์สังเคราะห์ต่างๆ และอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1,034 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและแบบตะกอนเล็กที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500 ถึง 500,000 และขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตร ได้สำหรับวิธี reverse osmosis สามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธี ultrafiltration นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองแผ่นเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ ณ ความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตด และไนลอน

วิธีที่กล่าวมามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีขมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม ในปัจจุบันวิธีที่ได้รับการนำมาใช้อย่างจริงจัง ได้แก่ วิธี ultrafiltration ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งพบว่าสามารถนำ ฟิวเอ โซดาไฟ สีขมอินดิโก และน้ำกลับมาใช้ได้อย่างประสบความสำเร็จ แม้ว่ากระบวนการนี้จะปรากฏให้เห็นว่าสามารถกำจัดสีขม และสารที่เติมได้ทุกประเภท แต่ก็ยังไม่มีนำมาใช้ในการปฏิบัติ เนื่องจากความยุ่งยากในการแยกสีผสม (สีผสมโดยส่วนใหญ่เป็นกรณีของน้ำจากขั้นตอนการย้อม และการตกแต่งสำเร็จ)

2. ซีโอไลต์ (Zeolite)

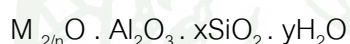
ซีโอไลต์ (Zeolite) คำว่า “ซีโอไลต์” มาจากภาษากรีกสองคำคือ zein แปลว่า ต้ม (to boil) และ lithos แปลว่า หิน (a stone) รวมความหมายคือ boiling stone หรือ หินเดือด เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกจะเกิดฟอง และไอน้ำออกมาจากก้อนผลึก เป็นสารประกอบอนินทรีย์ (กลุ่มออลูมิโนซิลิเกต)

2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบผลึกโครงสร้างผลึกของออลูมิโนซิลิเกตที่น้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ ซึ่งโดยมากมักจะเป็นหมู่ 1 และหมู่ 2 ได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม

(K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซึ่งมีลักษณะเป็น โครงสร้างสามมิติ ของอลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบกันเป็นอลูมิโนซิลิเกต โดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่ สิ้นสุด คือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer)

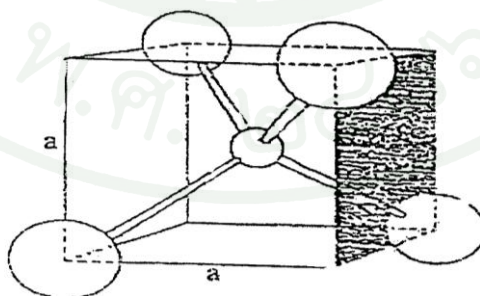
เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของช่องว่างหรือโพรงที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไป มีค่าประมาณ 3-10 อังสตรอม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน่วยของโครงสร้างผลึก จากการที่ซีโอไลต์มีขนาด ของโพรงที่สม่ำเสมอ จึงทำให้สมบัติของตะแกรงร่อนโมเลกุล (molecule sieve) ซึ่งซีโอไลต์ยอม ให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงเข้าไปในโครงสร้าง ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงไม่ สามารถผ่านเข้าได้ นอกจากซีโอไลต์ยังมีความสมบัติของตะแกรงร่อนโมเลกุลแล้ว ถ่านหิน แก้วที่มีรูพรุน (porous glass) ถ่านคาร์บอน (active carbons) ก็มีสมบัตินี้เช่นกัน แต่สมบัติของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง ขนาด รูปร่าง และช่องว่างภายในผลึก รวมไปถึงตำแหน่งของประจุและขนาดของไอออนบวกที่อยู่ในโครงสร้าง (Szostak, 1989) สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ

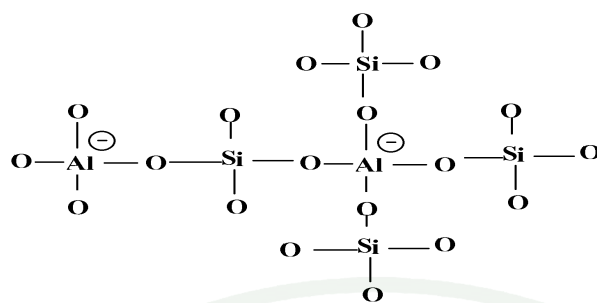
x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์



ภาพที่ 11 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออลูมิเนียมในหน่วยเล็กๆ ของซีโอไลต์ (Sub unit) ของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ)

ที่มา: Breck (1974)



ภาพที่ 12 โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต

ที่มา: สัญขนาด และสมบัติ (2540)

ซิลิกอน- ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) จะมีประจุลบสี่และอะลูมิเนียม- เตตระฮีดรอล (AlO_4) มีประจุเป็นลบห้า การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล เป็นโครงสร้างตาข่ายทำให้เกิดประจุลบขึ้น เนื่องจาก Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะแอลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (Bhatia, 1990)

2.2 การเกิดซีโอไลต์

ซีโอไลต์เกิดขึ้นได้ 2 วิธี (มนตรี, 2542)

2.2.1 ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (Mineral Zeolite or Naturally Occuring Zeolite)

ค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซึ่งซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์ต่าง อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วนหรือทั้งหมด โดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติตาม Hydrological system ได้ดังนี้ คือ

1) Saline, Alkaline lakes (การเปลี่ยนแปลงของผิวโลก) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนนี้จะทำให้เกิดระบบ close resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุม lake chemistry

2) Saline, Alkaline Solids ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมทำให้เกิดซีโอไลต์ใน Saline Alkaline solis การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลผ่านชั้นดิน แล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนตทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น และทำให้เกิดอะมิโนซิลิเกตในพื้นดิน

3) Marine Sediment เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

4) Open Hydrological Systems เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

5) Hydrothermal Systems เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลน์กับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยอุณหภูมิ ความสามารถในการแยกได้ของแร่หินและลักษณะของไหลที่ไหลผ่านในส่วนที่ดันและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ luamonte ซึ่งระบบนี้จะมีอุณหภูมิเป็นปัจจัย กำหนดการตกตะกอนเดิมได้มีการใช้ในอุตสาหกรรมการทำกระดาษและ molecular sieve ในการแยกก๊าซและแอมโมเนีย

6) Burial Diagenetic System ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanic sediment)

7) Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกระหว่างชั้นหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน interstitial และ globules

8) เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erioite, harmotome และ philipsite

2.2.2 ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthesis zeolites)

เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งที่เป็นเจล (gelation) เป็นรูพรุน (porous) มีลักษณะคล้ายเม็ดทราย (sandlike) ซึ่งการควบคุมปัจจัยจะทำให้เกิดผลึกจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอ ได้แก่ zeolite A, X และ Y ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่ได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่นวิธีการเรียกชื่อที่คล้ายระบบของ IUPC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

- Anaclime ($\text{Na}_{16}(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-16-อะลูมิเนียม-32-ซิลิเกต-16-น้ำ
- Jadeite ($\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{24}$) เรียกว่า โซเดียม-4-อะลูมิเนียม-8-ซิลิเกต
- Zeolite A ($\text{Na}_{12}(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$) เรียกว่า โซเดียม-12-อะลูมิเนียม-12-ซิลิเกต-27-น้ำ

การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์ สำหรับวิธีอื่นๆ เช่นอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นวิธีที่นิยมกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมกับงานวิจัยและมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่าและยังมีความบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมือนกันทุกครั้ง โดยเฉพาะสารเจือปนที่มีอยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่น ปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา heterogeneous catalyst

2.3 กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์แบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้โดยการนำแหล่งซิลิกาและอะลูมินาและสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะมาผสมกันแล้วได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเจล ซึ่งจัดเป็นสาร hydrous metal aluminosilicates ที่ได้จากการโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ของซิลิเกตและอะลูมินาที่อยู่ในสารละลายโดยมีกลไกการเกิดโพลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization)

machanism) เจลที่ได้จะถูกนำมาสังเคราะห์ด้วยการตกผลึกภายใต้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 175 องศาเซลเซียส หรือบางครั้งอาจถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้เป็นระบบออตโตเมติกซึ่งประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับความดันอิ่มตัว (saturated vapor pressure) ของน้ำในอุณหภูมิที่กำหนด โดยระยะเวลาที่ใช้ตกผลึกอาจต้องใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง จนถึงระยะเวลาเป็นวัน

หลังจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์แล้ว ซีโอไลต์ที่ได้จะถูกนำไปอบและให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนและกำจัดน้ำออกจากผลึก จากนั้นนำไปเผาในอากาศเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออกไปซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ทั้งนี้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน คืออัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ซึ่งมีผลต่อความว่องไวในปฏิกิริยาและความเสถียรของโครงสร้างซีโอไลต์ ซึ่งซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง มีผลทำให้โครงสร้างเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ สมบัติของซีโอไลต์ขึ้นกับลักษณะโครงสร้าง ขนาดรูปร่าง และช่องว่างภายในโพรงผลึก รวมถึงตำแหน่งของประจุและขนาดของไอออนบวกที่อยู่ในโครงสร้าง (Bhatia, 1990)

2.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างแน่นอนและค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อย ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้าน (Dyer, 1988) ดังนี้

2.4.1 เป็นสารดูดซับ

การใช้ซีโอไลต์เป็นสารดูดซับจะใช้ในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เช่น กระบวนการ drying ของ natural gas แยก CO_2 และสารประกอบซัลเฟอร์จากธรรมชาติ แยกสารที่ทำให้เกิดมลภาวะ เช่น SO_2 , NO_2 , แยก O_2 จากอากาศ เป็นต้น เนื่องจากคุณสมบัติที่มีความพรุนมากในโมเลกุลของซีโอไลต์ จึงสามารถดูดซับสารโมเลกุลอื่นๆ ได้ดีเยี่ยม โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุลในการแยกสารต่างๆ ออกจากกัน

2.4.2 เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

การใช้ซีโอไลต์แยกสาร radio-isotope จากกากของเสีย กำจัดแอมโมเนียในน้ำ ที่กำจัดสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว เหล็ก โปรท ใช้เป็น detergent builder ในอุตสาหกรรมผงซักฟอกช่วยให้ผ้าขาวสะอาด เป็นต้น

2.4.3 เป็นสารลดความกระด้าง (water softener)

ซีโอไลต์ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำได้เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออนได้

2.4.4 เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม

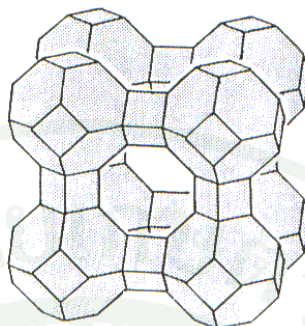
การใช้ซีโอไลต์เป็น cracking catalyst ในอุตสาหกรรมน้ำมัน จะใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลเป็น gasoline และยังใช้ในกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนให้มีคุณสมบัติเฉพาะเจาะจงมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวรีฟอร์มมิ่ง การกำจัดไอน้ำ การเติมหมู่อัลคิลในเบนซิน และการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของโซลีน

ผลึกของซีโอไลต์มีรูพรุนหรือช่องว่างที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนเป็นวง ซึ่งขนาดของวงแทนด้วยอะตอมของออกซิเจน เนื่องจากขนาดอะตอมของออกซิเจนใหญ่กว่าอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งอาจเป็น Si^{4+} , Al^{3+} หรือ Ga^{3+} เป็นต้น ดังนั้นผิวภายในของซีโอไลต์จึงประกอบไปด้วยอะตอมของออกซิเจนเกือบทั้งหมด ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 3 ขนาด (จตุพร, 2547)

1) รูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม เช่น รูพรุนของซีโอไลต์เอ

2) รูพรุนขนาดกลาง ที่มีขนาดรูพรุน 5-6 อังสตรอม เช่น รูพรุนของซีโอไลต์ ZSM-5

3) รูพรุนขนาดใหญ่ ที่มีขนาดรูพรุน 7-8 อังสตรอม เช่น รูพรุนของซีโอไลต์
ฟูจาไซต์



ภาพที่ 13 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ

ที่มา: กุลวดี (2545)

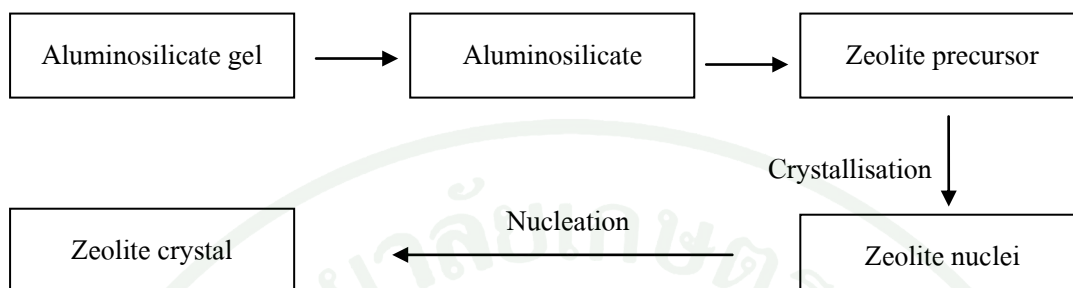
2.5 ซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอ มีโครงสร้างที่เกิดจาก polyhedral 2 ชนิด ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างซีโอไลต์เอ ดังรูปที่ polyhedral ชนิดแรกคือ สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ เกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรัล (SiO_4)⁴⁻ และ (AlO_4)⁵⁻ 8 โมเลกุล ดังรูปที่ และ polyhedral ชนิดที่สอง คือ ออกเตดราฮีดรัลเกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรัล 24 โมเลกุล ซึ่งเรียกว่า β - cage ที่มีขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.6 อังสตรอม และ α -cage มีขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.4 อังสตรอม ทำให้มีช่องเปิดขนาด 4.1 อังสตรอม (กุลวดี, 2545)

2.5.1 ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์

การเกิดซีโอไลต์เริ่มจากสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของแข็ง ละลายกรดเป็นสารละลายหรือเจล การที่ซิลิกอนจะละลายออกมาเป็นสารละลายได้จะต้องใช้สถานะที่มีค่าความเป็นเบสสูง จากนั้นซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมที่เป็นสารละลายซึ่งมีความไม่เสถียร จะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งเป็นสื่อ (precursor) ของซีโอไลต์ (secondary building unit รูปร่างต่างๆ) จากนั้นสื่อซีโอไลต์จะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์เล็กๆ ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกัน ซีโอไลต์เหล่านี้จะประกอบไปด้วยเซลล์หน่วย (unit cell) ของ

ซีโอไลต์ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับซีโอไลต์ที่จะสังเคราะห์ จากนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการโตของผลึก ทำให้ผลึกของซีโอไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 14



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์

ที่มา: นิภัทร (ม.ป.ป.)

2.5.2 อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา

อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามีผลต่อขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์ กล่าวคือ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็นตัวกำหนดโครงสร้างซีโอไลต์ คือ ถ้าปริมาณของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงมากจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นช่อง (channels structure) เช่น มอร์เดไนต์ แต่ถ้ามีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ มักจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างแบบโพรง (cage structure) เช่น ซีโอไลต์ และซีโอไลต์เอ็กซ์ เป็นต้น

นอกจากนั้นอัตราการเกิดผลึกยังขึ้นกับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาอีกด้วย กล่าวคือ ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลด้า จะมีอัตราในการตกผลึกเร็วเนื่องจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะแสดงประจุลบ จึงถูกเหนี่ยวนำโดยไอออนบวกที่ใช้สังเคราะห์ให้เกิดเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์ได้ง่ายกว่าเจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง

2.5.3 ความเป็นกรด-ด่าง

ซิลิกอนสามารถละลายได้ดีที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายสูงๆ ดังนั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงต้องใช้สารละลายที่มีค่าความเป็นความเป็นกรด-ด่างสูง เพราะจะทำให้

ซิลิกอนที่อยู่ในสภาวะของแข็งละลายออกมาเป็นสารละลายได้ดี เมื่อซิลิกอนละลายออกมาเป็นสารละลายก็จะเกิดการตกผลึกของซีโอไลต์ แต่สารละลายไม่ควรมีความเป็นเบสสูงเกินไป เพราะทำให้ซิลิกอนที่อยู่ในรูปสารละลายไม่สามารถตกผลึกเป็นซีโอไลต์ได้

2.5.4 อุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิและความดันต่างกันมีผลทำให้ผลึกซีโอไลต์ได้รูปต่างกัน นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ยังเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการตกผลึก โดยที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงจะมีผลให้ระยะเวลาสั้นกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของซีโอไลต์ เอ

Structure Group:	3
Reference:	102, 103, 105 – 112, 115, 172
Chemical Composition	
Typical Oxide Formula:	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$
Typical Unit Cell Content:	$\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2\text{O}_3)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$, pseudo cell and 8X for true cell
Variations:	$\text{Si}/\text{Al} \approx 0.7$ to 1.2; occlusion of NaAlO_2 in β -cages
Crystallographic Data	
Symmetry:	Cubic
Density:	1.99g/cc
Space Group:	$\text{Pm}\bar{3}\text{m}$
Unit Cell Volume:	$1870 \text{ \AA}^3$
	($\text{Fm}\bar{3}\text{c}$ for true cell) pseudo cell
Unit Cell Constants:	$a = 12.32 \text{ \AA}$, pseudo cell
X-Ray Powder Data:	Table 4.26

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Structural Properties		
Framework:	Stereo 2.16	Cubic array of β -cages linked by D4R units
Channel System:	SBU: D4R	Void volume: 0.47 cc/cc
	Cage type: α , β	Framework density: 1.27 g/cc
Hydrated –		
	Free Apertures:	Three- dimensional, $\parallel$ to [100]; 4.2 Å and
	Cation Locations:	$\parallel$ to [111]; 2.2 Å minimum diameter
Dehydrated –		
	Free Apertures:	2.2 Å into β -cage and 4.2 Å into α -cage
	Cation Locations:	8 S_I on 6- ring, 4 cations with H_2O in the 8 -rings
	Effect of Dehydration:	None on framework, 4 cations move to S_{II}
Location of H_2O Molecules:	Dodecahedral arrangement in α -cage	
	4 molecules in β -cage	
Lasgest Molecule Adsorbed:	C_2H_4 at RT, O_2 at $-183^\circ C$	
Kinetic Diameter, σ , Å:	3.9 and 3.6	

ที่มา: Breck (1974)

3. ชานอ้อย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยมากประเทศหนึ่ง ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อยส่วนหนึ่งเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำของโรงงาน ดังนั้นปริมาณของชานอ้อยที่จะนำมาทำเป็นวัตถุดิบเส้นใยในการผลิตเยื่อกระดาษจึงเป็นส่วนที่เหลือจากการใช้ของโรงงานน้ำตาล และปริมาณชานอ้อยที่เหลือจากการใช้ของโรงงานน้ำตาล และปริมาณชานอ้อยที่เหลือจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผลิตน้ำตาลทรายขาวกับน้ำตาลทรายดิบ ซึ่งโดยปกติน้ำตาลทรายขาวจะใช้ไอน้ำมากกว่าน้ำตาลทรายดิบ และขึ้นกับประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำของโรงงานน้ำตาลและราคาพลังงานอื่นๆที่ใช้ทดแทนกันได้ ชานอ้อยจะมีเส้นใยยาวประมาณ 0.8-2.8 มิลลิเมตร เฉลี่ย 1.6 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-34 ไมโครเมตร เฉลี่ย 20 ไมโครเมตร และมีส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้คือ เซลลูโลส 26-39% ลิกนิน 19-22% Hot water

solution 3-11% alcohol benzene soluble 3-11% และ ash 1-5% สำหรับผลผลิตเชื้อฟอกขาวที่ใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบจะมีค่าอยู่ในช่วง 40-45% (ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย, 2550)



ภาพที่ 15 ชานอ้อย

4. การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบของสารที่ต้องการ (absorbent) ออกจากของไหล ซึ่งของไหลที่ต้องการแยกอาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซ โดยองค์ประกอบที่ต้องการจะไปยึดเกาะที่บริเวณพื้นผิวของของแข็ง (adsorbent) โดยกลไกการดูดซับเกิดจากคุณสมบัติของพื้นผิวของของแข็งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับซึ่งประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยโมเลกุลของของไหลแพร่เข้าไปภายในรูพรุนและจะถูกดูดซับภายใน โดยที่กลไกการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวดูดซับ และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทั้งตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และตัวดูดซับ (adsorbent) จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (molecular layers) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

4.1.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของสารดูดซับ คือขนาดของสารดูดซับและพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดซับเป็น

อัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ นั่นคือ ถ้าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดซับโมเลกุลสารถูกดูดซับได้มากกว่า

4.1.2 ขนาดของสารดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

ขนาดของสารดูดซับมีความสำคัญอย่างมากต่อผลของการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในรูพรุนของสารดูดซับ จากการวิจัยพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับจะมีค่ามากที่สุด

4.1.3 ความดันป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าความดันป่วนต่ำจะส่งผลให้ชั้นฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเนื่องจากไม่ถูกรบกวน จึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความดันป่วนสูงจะส่งผลทำให้ชั้นฟิล์มบาง เป็นผลทำให้โมเลกุลสารดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ทำให้ pore diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4.1.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำไปเกาะติดบนพื้นผิวของแข็ง ดังนั้นสารที่ละลายน้ำได้ (แตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย สามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้พบว่ามีการละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถกล่าวได้ว่า เกิดมีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำ

4.1.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับ ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลสารดูดซับ กล่าวคือ กรณิที่เป็นสารละลายไอออน ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างต่ำๆจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะได้ผลตรงกันข้าม เมื่อเป็นการดูดซับที่มีความเป็นกรด-ด่างสูง

4.1.6 อุณหภูมิ

ขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับของระบบเป็นตัวดูดซับประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี โดยปกติอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความร้อน จะช่วยเร่งสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น

5. การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัสกระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ดูดติด เรียกว่าสารดูดติดผิว (adsorbent) สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดที่ผิวได้ มีหลายชนิดซึ่งอาจแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

- 1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) activated silica เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่จำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสียคือจับโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด
- 2) ถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่า สารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม
- 3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin)

ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

5.1 กลไกการดูดติดผิว

เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวและของแข็งหรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) Bulk solution transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวการเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยการแพร่
- 2) Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิวระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหลถ้าอัตราไหลสูงระยะทางสั้น
- 3) Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ
- 4) Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้นและดูดติดผิวทางกายภาพ ขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัดในถึงปฏิกิริยาที่มีความปั่นป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิว pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด (นิพนธ์และคณะ, 2550)

5.2 สมดุลของการดูดติด (adsorption equilibrium)

การดูดติดของสารละลายบนผิวของสารดูดติดในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อยๆ นี้สารที่ถูกดูดติดก็มีแนวโน้มที่จะคายกลับมาสู่สารละลายเหมือนเดิมความเข้มข้นของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่จำนวนสารละลายที่ถูกดูดติด จะถูกคายออกมาจากการดูดติดก็จะมีปริมาณเท่าๆ กันผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดติดและการคายสารออกมาก็จะถึงจุดสภาวะ

สมดุล ซึ่งจะเรียกว่าสมดุลของการดูดติด โดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายบนผิวของสารดูดติด หรือความเข้มข้นของตัวสารละลายเอง การเพิ่มปริมาณสารที่ถูกดูดติดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย การแสดงจำนวนของสารละลายที่ถูกดูดติดต่อจำนวนของสารดูดติดที่อุณหภูมิคงที่ จะเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติด (adsorption equilibrium) (ปิยะ, 2545)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์ค่าคงที่ต่างได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติดโดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายประการ แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ Langmuir Adsorption Isotherm และ Freundlich Adsorption Isotherm

1) Langmuir Adsorption Isotherm มีสมมุติฐานที่สำคัญคือ

1.1 มีพื้นที่สำหรับการดูดติดจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

1.2 แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดผิว จะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นหรือกล่าวได้ว่ามีการดูดติดเพียงชั้นเดียว

1.3 ตรงบริเวณดูดติดผิวจะเกิดอัตราการดูดติด และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดติดมีมากกว่าอัตราการคายออกจนกระทั่งถึงภาวะสมดุล (อัตราการดูดติดเท่ากับการคายสารออก) นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดติดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิว หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้เคียงได้

สำหรับสมการ Langmuir เขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e}$$

โดยที่ $X = X/m$ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง; มก./ก.

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว ; มก./ก.

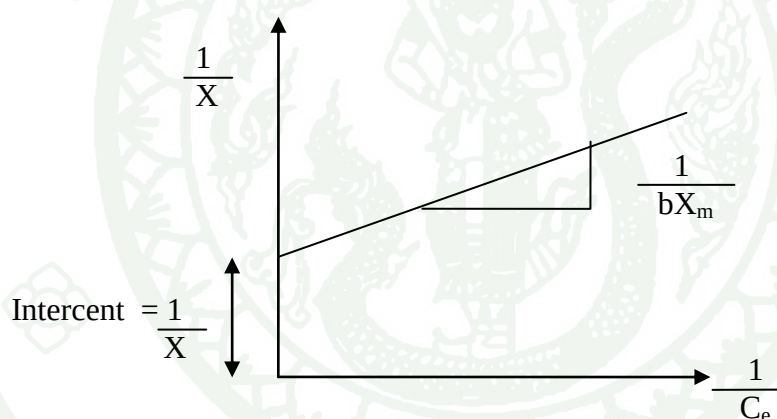
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มก./ล.

b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดติด ; ล./มก.

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/XC_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ จุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_mC_e}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ มาเขียนกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ได้ดังรูปที่ 16



ภาพที่ 16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir

2) Freundlich Adsorption Isotherm จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมาก สมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดติดในระบบของเหลว สมการของ Freundlich เขียนได้ดังสมการ

$$\frac{X}{M} = KC_e^{1/n}$$

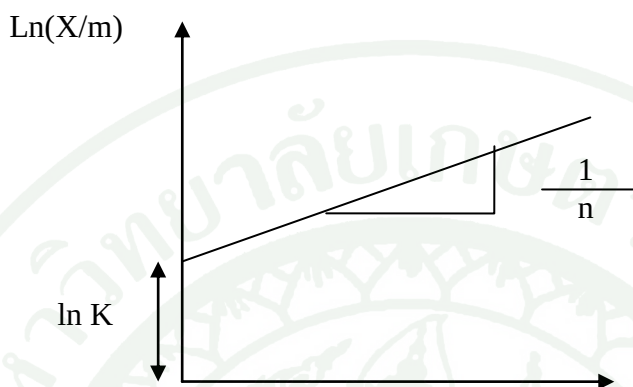
โดยที่ X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนัก; มก./ก.

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มก./ล.

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว ; ล./มก.

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/m)$ และ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง



ภาพที่ 17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich

จากภาพที่ 17 มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $1/n$ และที่จุดตัดแกนนอนเท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดติดของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดติดส่วนใหญ่จะมีค่า $\ln K$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูงจะมีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่าความสามารถการดูดติดที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้ต่ำลง และในกรณีที่ความชันมีค่าน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่า ความสามารถในการดูดติดนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลงจากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดของสารดูดติด หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดติดจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดติดที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว จากค่า X ในสมการ ด้วยค่า $(C_0 - C_e)$ โดยที่ค่า C_0 คือค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว สมการที่ได้ดังนี้

$$\frac{\ln(C_0 - C_e)}{M} = \frac{\ln K + 1}{n} \ln C_e$$

สมการนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดซับทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไชยวัฒน์ (2548) ได้ศึกษาการปรับปรุงเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยลิกไนท์เพื่อกำจัดแคดเมียม และศึกษาผลของปริมาณสารช่วยพูนคือโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใส่ลงในอัตราส่วนร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนักภายหลังจากการเผาไล่สารช่วยพูนที่ 800 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณสารช่วยพูนที่ใส่ลงในส่วนผสม ซึ่งจะมีส่วนเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงของไอออนในสารละลายตัวกลางได้ และเมื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดแคดเมียมแบบไม่ต่อเนื่องของเม็ดซีโอไลต์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าร้อยละ 98 สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 3.14 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมซีโอไลต์

ประรัชกรณ์ (2546) ได้ทำการทดลองพบว่า การใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติสามารถกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีออกได้ โดยสีเป็นประเภท Basic dyes ในการทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เหมาะสมคือ ที่ความเร็วรอบในการกวนน้ำ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการสัมผัส 3 ชั่วโมงและปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติ 10 กรัมต่อลิตร

ปัญญา (2543) ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสี โดยผ่านระบบถังทรายกรองช้า (slow sand filters) ก่อนทำการบำบัดโดยวิธีการดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์ทำให้ระบบการบำบัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คือสามารถกำจัดสี, ซีโอดี โดยเฉพาะความขุ่นและของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 18.05, 31.36, 90 และ 70.71 ตามลำดับ และที่อัตราน้ำล้นผิว 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร-เซนติเมตร ในความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 80 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพน้ำทิ้งที่ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี, ซีโอดี, ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยร้อยละ 73.60, 85.20, 83.75, 86.78 และ 75.93, 85.98 ตามลำดับ

สมชาย (2514) ได้ทำการทดลองพบว่า การใช้ activated carbon column โดยให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นของ powder activated carbon เพื่อดูดซับพวกอินทรีย์สารต่างๆ จะช่วยลดสีจากโรงงานฟอกย้อมได้ดีกว่าวิธี coagulation

อนรรฆพร (2549) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อย คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลาย spent alkaline 2 โมลาร์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 418.36 เซนติโมลต่อกิโลกรัมและ 286.29 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ศึกษาการนำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่วแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 และความเข้มข้นตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับที่สภาวะดังกล่าวเป็นสมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline มีค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 78.31 และ 65.23 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

Jain *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีจากโรงงานกระดาษโดยวิธีการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับจากเศษเถ้าขานอ้อยที่อยู่ตามท้องถิ่น ผลการทดลองที่ได้คือ ช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีที่มีประสิทธิภาพที่สุด คือ 60 นาที โดยใช้จำนวนในการดูดซับ 2 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดสีจากโรงงานได้ถึงร้อยละ 86

Ghash (1978) กล่าวว่า การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่วไป วิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์-เคมี แม้ว่าระบบกำจัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสีได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (chemical coagulation) หรือไม่ก็ตาม เป็นวิธีสามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้ การรวมขบวนการทางชีววิทยาและการดูดซับทางเคมีได้ (chemical adsorption) สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำเสียของโรงงานทอผ้าได้

Mckay (1979) ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมแห่งมหาวิทยาลัยควีนที่ไอร์แลนด์เหนือ กล่าวถึงวิธีการกำจัดสีของน้ำเสียไว้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดที่ประหยัดและดีที่สุดในการกำจัดสีของน้ำเสีย น้ำเสียแต่ละชนิดจะมีปัญหาเฉพาะแห่ง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำเสียนั้นควบคู่ไปด้วย เช่น สภาพท้องถิ่น สีย้อม และสารเคมีที่ใช้ ปริมาณและส่วนประกอบน้ำเสีย เป็นต้น ในอดีตวิธีการบำบัดทางชีววิทยาได้ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับโรงงานทอผ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่มีขีดจำกัดพอสำหรับกำจัดสีย้อม วิธีการในการกำจัดสีมีหลายวิธี ได้แก่

adsorption, ion-exchange, chemical oxidation เช่น foam fractionation, dynamic membrane hyperfiltration, gamma radiation, electrolytic treatment เป็นต้น

Ong *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีประเภทเบสิกและรีแอกทีฟโดยใช้ ethylenediamine ร่วมกับเปลือกข้าว ผลการทดลองที่ได้คือ ได้ช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มากกว่า 4 จลพลศาสตร์ของการดูดซับสีที่เหมาะสม คือ Pseudo - second - order และค่าไอโซเทอมในการดูดซับใช้สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isoterm) ค่าสูงสุดในการดูดซับสี basic blue และ reactive orange เท่ากับ 14.68 และ 60.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Ozdemir *et al.* (2009) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบบต่อเนื่อง โดยใช้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ (surfactant-modified zeolite: SMZ) โดยใช้สารละลาย quaternary amine surfactant hexadecyltrimethylammonium bromide (HTAB) ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยศึกษาค่าความสูงของตัวดูดซับ และอัตราการไหล โดยเจือจางน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 30 เซนติเมตร โดยมีความสูงของตัวดูดซับ ที่ 12.5, 25, 37.5, 50 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาตรน้ำเสียจริง ที่ 5.25, 19.5, 35.25 และ 51 ลิตร ด้วยอัตราการไหลที่ 0.015 ลิตรต่อนาที จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 0.025-0.075 ลิตรต่อนาที จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมต่ำลง การลดค่าความสูงของตัวดูดซับจะส่งผลให้กราฟ breakthrough curve เริ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเร็วในการอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และจากผลการเพิ่มความสูงของตัวดูดซับจะส่งผลต่อปริมาตรหลังผ่านการกำจัดสี

Wong *et al.* (2009) ทำการกำจัดสีประเภทเบสิก และรีแอกทีฟ โดยใช้เศษเถาขานอ้อยกับ quaternary ammonium chloride ในการกำจัดสี ซึ่งช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-8 และค่าไอโซเทอมในการดูดซับ คือแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ได้ค่าสูงสุดเท่ากับ 37.59 และ 34.48 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีเบสิกและรีแอกทีฟตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 เครื่องชั่งสาร ละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น AND HM-300 Japan
- 1.2 เครื่อง UV-visible spectrophotometer ยี่ห้อ DR LANGE รุ่น CADAS 100
- 1.3 เครื่องเขย่า (shaker)
- 1.4 ชุดเครื่องแก้ว
- 1.5 เครื่องดูดลมและเครื่องกรอง (Vacuum pump and suction flask) ยี่ห้อ Hailea
- 1.6 กระดาษกรอง whatman GF/C
- 1.7 ตู้อบความร้อน (Hot air-oven) รุ่น LINDBERG
- 1.8 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น DAKLON
- 1.9 สีสั่งเคราะห์ชนิดเบสิก คือ Astrazon Blue และ Basic Red 46
- 1.10 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ กลุ่มม่อฮ่อมหมู่ 4 จ.แพร่
- 1.11 ชุดคอลัมน์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร
- 1.12 ตัวดูดซับ คือ ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากเถาซานอ้อย และซีโอไลต์มาตรฐานจากบริษัท Thai Silicate Chemicals Co.ltd
- 1.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน :Scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL

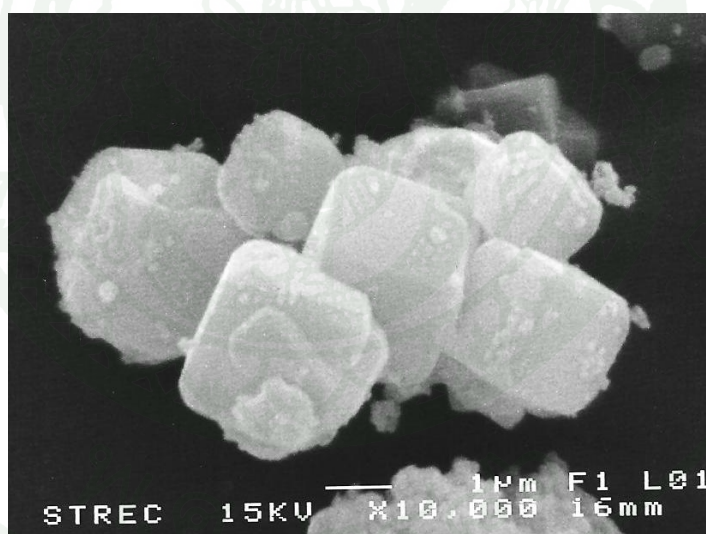
2. สารเคมี

- 2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท Ajax Finechem
- 2.2 ซัลฟิวริก (H_2SO_4) บริษัท Merck KGaA

วิธีการ

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการดูดซับสีสังเคราะห์ชนิดเบสิกและน้ำเสียจากสีย้อมโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อส้ม จ. แพร่ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยที่มีสัดส่วนโดยโมลเท่ากับ $5.01 \text{ Na}_2\text{O} \cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 1.14\text{H}_2\text{O}$ (เรวดี, 2551) และซีโอไลต์มาตรฐานเป็นสารดูดซับ ในระบบแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง ผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อย มีดังนี้

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 Scanning microscope ยี่ห้อ JEOL ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยนั้นมีโครงสร้างเป็นทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด 3 ไมโครเมตร (เรวดี, 2551) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากสภาวะกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1. การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อย

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ชนิดเบสิก ได้แก่ สี Astrazon blue และ Basic red 46 โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) ด้วยเครื่องเขย่า (shaker) ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

1.1 ศึกษาหาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน

1) ตวงน้ำเสียประเภทสีสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร

2) เติมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ โดยมีขวดควบคุมจำนวน 1 ใบที่ไม่เติมวัสดุดูดซับ

3) นำทุกขวดไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมในการบำบัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

4) แยกสารซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้ชุดเครื่องกรอง (suction flask) กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

5) นำสารละลายสีวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสี โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 605 นาโนเมตรของสี Astrazon blue และ 533 นาโนเมตรของสี Basic red 46 ตามลำดับ

6) นำผลที่ได้ไปหาค่าการบำบัดสีในน้ำเสียจากสีข้อม โดยใช้สูตรดังนี้

$$\frac{A-B}{A} \times 100$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงก่อนดูดซับ

B = ค่าการดูดกลืนแสงหลังดูดซับ

7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) - (6) โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน

1.2 ศึกษาหาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน

1) ตวงน้ำเสียประเภทสีสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) เติมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ โดยมีขวดควบคุม
จำนวน 1 ใบที่ไม่เติมวัสดุดูดซับ เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่
อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 0, 2, 6, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360 และ 420 นาที
เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์

3) แยกสารซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้ชุดเครื่องกรอง (suction flask) กรองผ่าน
กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

4) นำสารละลายสีวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสี โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืน
คลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น
สูงสุด 605 นาโนเมตรของสี Astrazon blue และ 533 นาโนเมตรของสี Basic red 46 ตามลำดับ

5) นำผลที่ได้ไปหาค่าการบำบัดสีในน้ำเสียจากสีย้อม โดยใช้สูตรดังนี้

$$\frac{A-B}{A} \times 100$$

A

A = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงก่อนดูดซับ

B = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงหลังดูดซับ

6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) - (5) โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน

1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน

1) ตวงน้ำเสียประเภทสีสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140,

160, 180 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) เติมซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ โดยมีขวดควบคุมจำนวน 1 ใบที่ไม่เติมวัสดุดูดซับ เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาความเข้มข้นของสีที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์

3) แยกสารซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้ชุดเครื่องกรอง (suction flask) โดยการกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

4) นำสารละลายสีวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 605 นาโนเมตรของสี Astrazon blue และ 533 นาโนเมตรของสี Basic red 46 ตามลำดับ

5) นำผลที่ได้ไปหาค่าการบำบัดสีในน้ำเสียจากสีย้อม โดยใช้สูตรดังนี้

$$\frac{A-B \times 100}{A}$$

A = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงก่อนดูดซับ

B = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงหลังดูดซับ

6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) - (5) โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน

1.4 ศึกษาหาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน

1) นำน้ำสีสังเคราะห์ไปปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในแต่ละขวดรูปชมพู่ให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยใช้ 1 M NaOH และ 1 M H₂SO₄

2) ตวงน้ำเสียประเภทสีสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3) เติมน้ำซีโอไลต์สังเคราะห์ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ โดยมีขวดควบคุมจำนวน 1 ใบที่ไม่เติมน้ำซีโอไลต์ ไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ในการบำบัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

4) แยกสารซีโอไลต์สังเคราะห์โดยใช้ชุดเครื่องกรอง (suction flask) กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

5) นำสารละลายสีสังเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสี โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลิ่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลิ่นสูงสุด 605 นาโนเมตรของสี Astrazon blue และ 533 นาโนเมตรของสี Basic red 46 ตามลำดับ

6) นำผลที่ได้ไปหาค่าการบำบัดสีในน้ำเสียจากสีข้อม โดยใช้สูตรดังนี้

$$\frac{A-B \times 100}{A}$$

A = ค่าการดูดกลืนคลิ่นแสงก่อนดูดซับ

B = ค่าการดูดกลืนคลิ่นแสงหลังดูดซับ

7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) - (6) โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน

1.5 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์

1) เตรียมน้ำสีสังเคราะห์ชนิดเบสิก ปรับความเข้มข้นให้มีค่าเท่ากับความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 1.4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) เติมน้ำซีโอไลต์แต่ละชนิดคือ ซีโอไลต์มาตรฐาน และซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยแบบผง ที่ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 0.8 และ 1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากข้อ 1.3

3) แยกสารซีโอไลต์โดยใช้ชุดเครื่องกรอง (suction flask) โดยการกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

4) นำสารละลายสีวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสี โดยตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

5) นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดติดผิวของซีโอไลต์แต่ละชนิด คือ ซีโอไลต์มาตรฐาน และซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยแบบผง โดยใช้สมการ Adsorption Isotherm ของ Langmuir และ Freundlich

2. การศึกษาการจัดสีย้อมในระบบแบบต่อเนื่อง

ทำการศึกษาการดูดซับสีสังเคราะห์ชนิดเบสิกสีน้ำเงิน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องมาใช้ในการทดลองชุดคอลัมน์แบบต่อเนื่อง โดยใช้สีย้อมที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ซีโอไลต์ลงในคอลัมน์แบบอะคริลิก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ความสูงขององค์ประกอบในคอลัมน์ ได้แก่ กรวดสูง 10 เซนติเมตร ทราายสูง 10 เซนติเมตร และซีโอไลต์อัดเม็ด 30 เซนติเมตร (น้ำหนัก 42 กรัม) ดังภาพที่ 19 ในการศึกษาสภาวะต่างๆมีดังนี้



ก. คอลัมน์แบบจำลอง

ข. คอลัมน์จริงที่ใช้ในการศึกษา

ภาพที่ 19 (ก) คอลัมน์แบบจำลอง และ (ข). คอลัมน์จริงที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ศึกษาความเข้มข้นของสีของสื่อที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในระบบต่อเนื่อง โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย

นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาเจือจางให้มีความเข้มข้น 1, 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ป้อนน้ำผ่านคอลัมน์ที่อัตราการไหล 0.9 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บน้ำที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

2.2 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย

นำน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดเบสิก ป้อนน้ำผ่านคอลัมน์ที่อัตราการไหล ได้แก่ 0.9, 1.2, 2.4, 3.0, 3.6 และ 4.8 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บน้ำที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

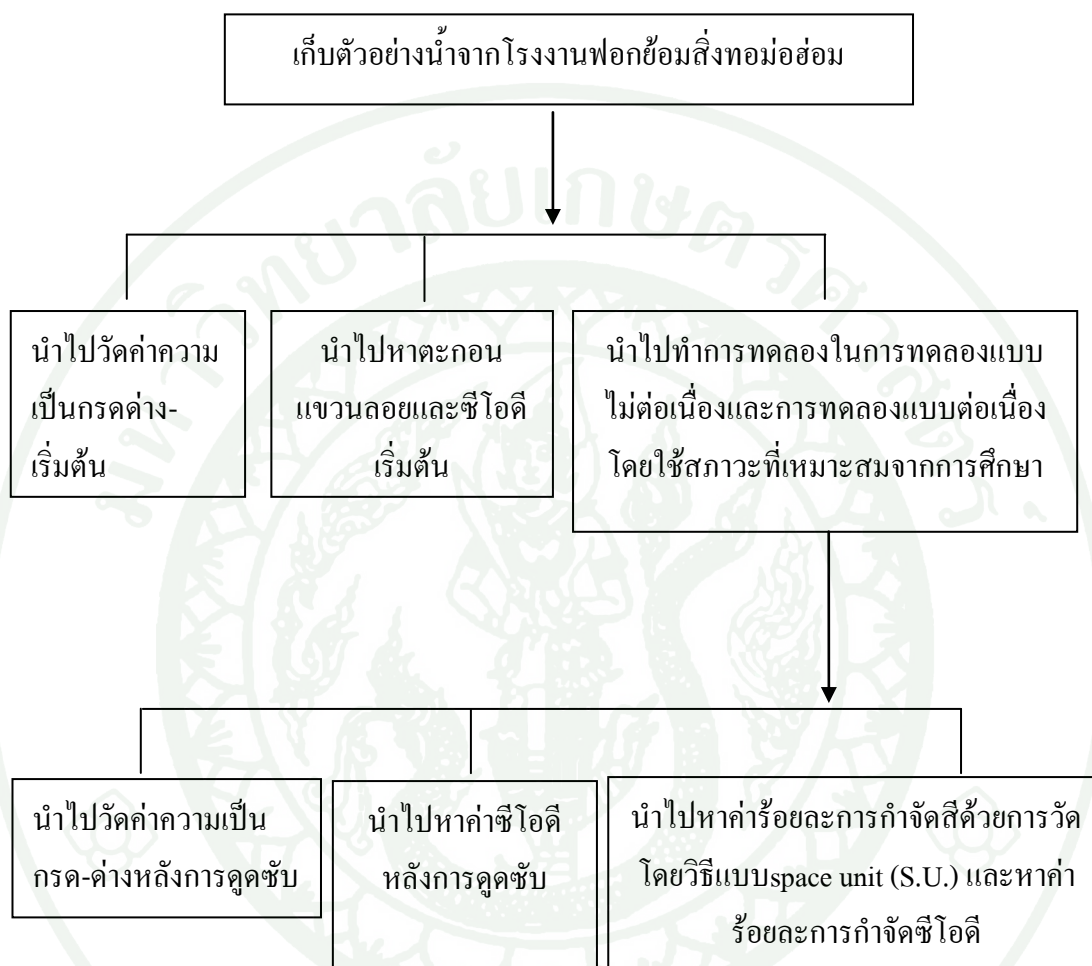
2.3 ศึกษาระยะเวลาในการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย

นำน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดเบสิก ป้อนน้ำผ่านคอลัมน์ที่ระยะเวลาในการผ่านคอลัมน์ต่างๆ ได้แก่ 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที เก็บน้ำที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

2.4 ศึกษามวลของซีโอไลต์ที่บรรจุในคอลัมน์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย

นำน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดเบสิก ป้อนน้ำผ่านคอลัมน์ที่บรรจุมวลในคอลัมน์ ได้แก่ 28, 42 และ 56 กรัม กรวด และทรายบรรจุในอัตราส่วนที่เท่ากัน เก็บน้ำที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

3. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อม จ. แพร่ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงการทดลองในการทดลองที่ 3

4. รายการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสียจากโรงงาน

การวิเคราะห์ ซีโอไซด์ (COD), พีเอช (pH), ตะกอนแขวนลอย (SS), อุณหภูมิ (Temperature), สี (Color) นั้นใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998) และคู่มือวิเคราะห์น้ำเสียของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย (2532) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์

รายการวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
ซีโอดี	Closed Reflux, Titrimetric Method
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	Electronic pH Meter รุ่น DAKLON
ค่าตะกอนแขวนลอย	กรองโดยใช้กระดาษ Whatman
สี	เครื่อง Spectrophotometer รุ่น CADAS 100

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลต่างๆ ในการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในขณะที่เดียวกันข้อมูลที่มีลักษณะบ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลให้นำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีหาความสัมพันธ์ถดถอย (regression analysis)

6. สถานที่ทำการวิจัย

ฝ่ายเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

7. ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2552 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2554

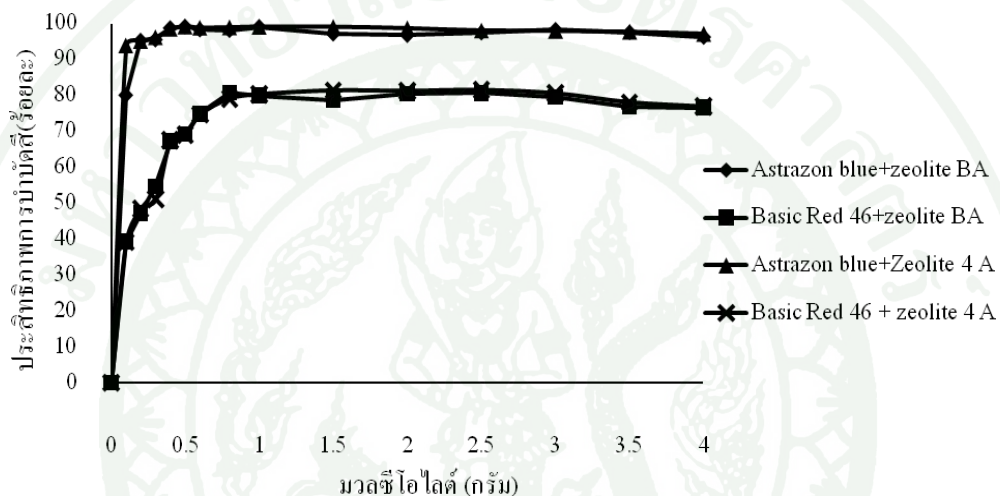
8. ทุนสนับสนุนการวิจัย

ทุนภาคีบัณฑิต สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ผลและวิจารณ์

1. การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

1.1 ศึกษาหาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (zeolite bagasse) และซีโอไลต์มาตรฐาน (zeolite 4 A)

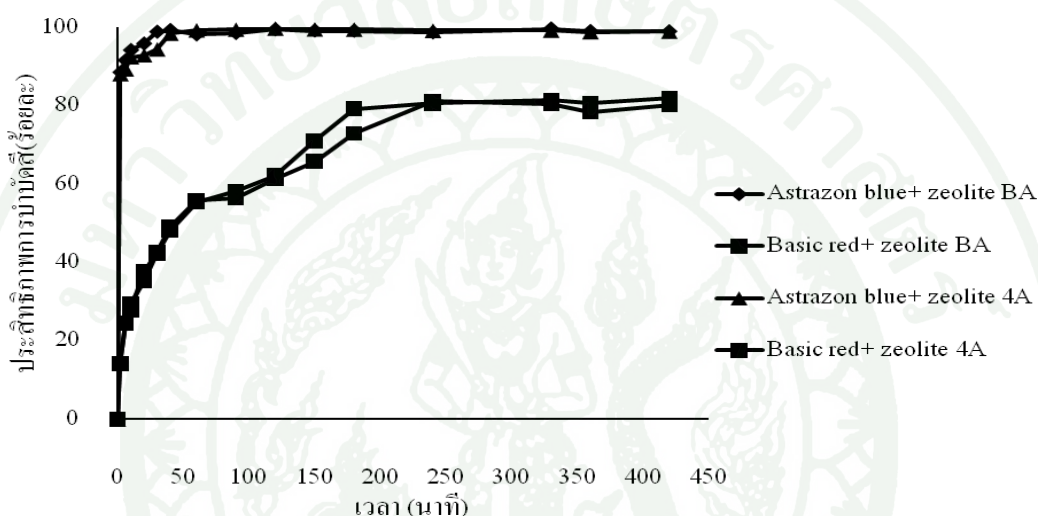


ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐานต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จากผลการศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐานต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีเบสิกในน้ำสีสังเคราะห์ แสดงผลดังภาพที่ 21 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสี Astrazon blue ของซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย มวลซีโอไลต์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือตั้งแต่ 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกใช้มวลที่ต่ำสุดคือ 0.5 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ร้อยละ 99.27 ± 0.25 ส่วนซีโอไลต์มาตรฐานให้ผลในทิศทางเดียวกัน พบว่า เมื่อใช้มวล 0.5 กรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดร้อยละ 99.29 ± 0.30 จึงพิจารณาได้ว่าที่มวลซีโอไลต์สังเคราะห์ 0.5 กรัม ในการดูดซับสี Astrazon blue เหมาะสมในการนำไปใช้ต่อไป ในส่วนของประสิทธิภาพในการดูดซับสี Basic red 46 มวลซีโอไลต์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกใช้มวลที่ต่ำสุดคือ 0.8 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ร้อยละ 80.83 ± 0.86 ส่วนการดูดซับสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน ให้ประสิทธิภาพใน

การดูดซับสูงสุด ร้อยละ 81.54 ± 2.41 เมื่อใช้มวล 1.5 กรัม เนื่องจากการเพิ่มตัวดูดซับซีโอไลต์สังเคราะห์ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับสีเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับโมเลกุลของสี (Wong *et al.*, 2009)

1.2 ศึกษาหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อย (zeolite bagasse) และซีโอไลต์มาตรฐาน (zeolite 4A)

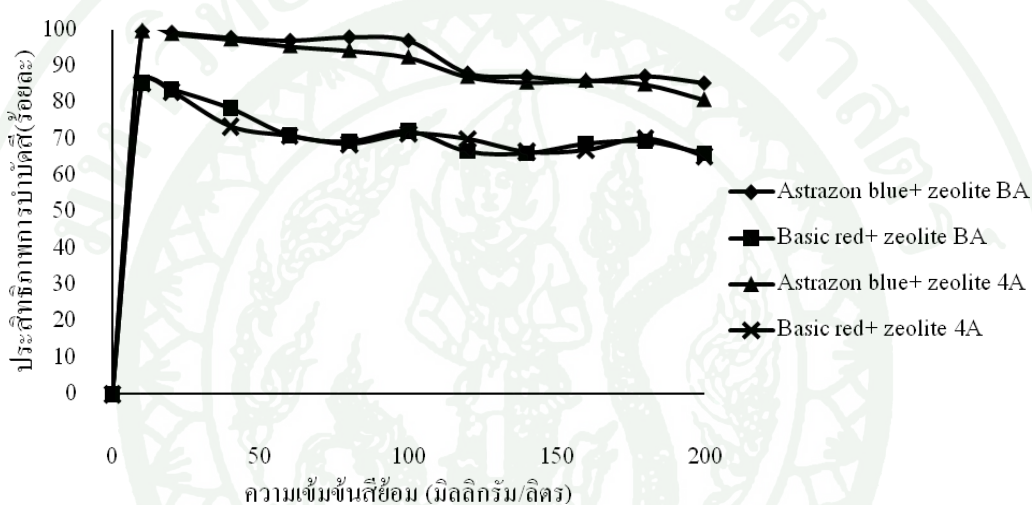


ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำสีสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จากผลการทดลองการศึกษาระยะเวลาสัมผัส ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีเบสิกในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยในการดูดซับสี Astrazon blue แสดงผลดังภาพที่ 23 พบว่า การดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเริ่มต้น (initial stage) ตั้งแต่นาทีที่ 0-30 นาที หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะคงที่ ระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี Astrazon blue สูงสุด ที่ระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 30-420 นาที และการดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน ประสิทธิภาพในการดูดซับจะคงที่ ที่ระยะเวลาสัมผัส 30-420 นาที ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการสัมผัสที่น้อยที่สุด คือ 30 นาที ส่วนการดูดซับสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 240-420 นาที ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการสัมผัสที่น้อยที่สุด คือ 240 นาที ส่วนการดูดซับสีโดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐานประสิทธิภาพในการดูดซับจะคงที่ ที่ระยะเวลาสัมผัส 180-420 นาที ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการสัมผัสที่น้อยที่สุด คือ 180 นาที การดูดซับสีเบสิกจะเพิ่มได้มากขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของการดูดซับ

ในช่วงระยะเวลาเริ่มต้น เนื่องจากในช่วงแรกก่อนการดูดซับซีโอไลต์จะมีช่องว่างปริมาณสูงและสามารถดูดซับเข้าไปได้มากจึงสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่งช่องว่างของพื้นผิวที่ยังคงเหลือจะยากต่อการใช้งาน เนื่องจากเกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลของสารละลายกับพื้นผิวของตัวดูดซับ (Jain *et al.*, 2009)

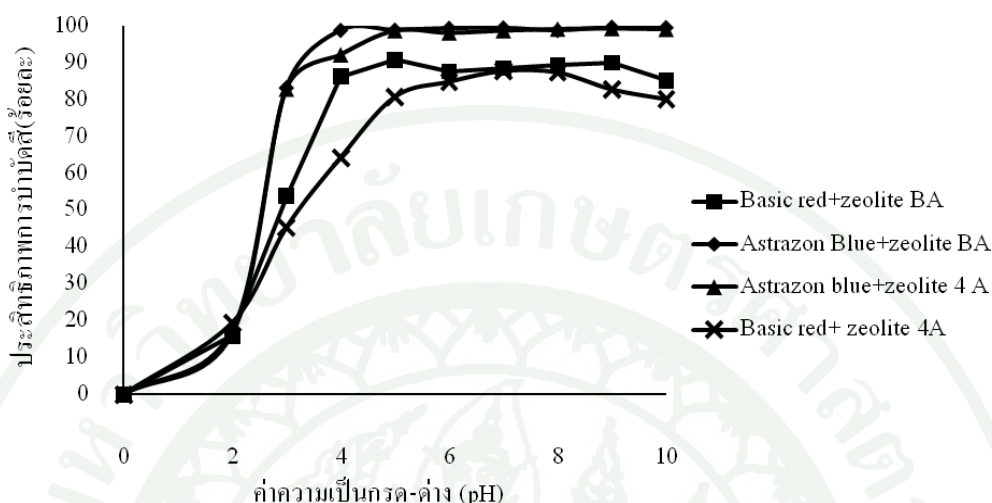
1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย(zeolite bagasse) และซีโอไลต์มาตรฐาน (zeolite 4A)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จากผลการทดลองการศึกษาค้นคว้าหาความเข้มข้นสีย้อมที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีเบสิกในน้ำสีสังเคราะห์แสดงผลดังภาพที่ 24 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสี Astrazon blue และ Basic red 46 ที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย จะสามารถบำบัดสีได้ถึงร้อยละ 99.45 ± 0.61 และ 83.77 ± 1.24 ตามลำดับ เมื่อใช้ซีโอไลต์มาตรฐานพบว่าให้ผลการดูดซับสอดคล้องกับซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย เนื่องจากโมเลกุลของสีจะเข้าปะทะกับพื้นผิวตัวดูดซับ จะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวและสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของโครงสร้างตัวดูดซับ และเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มมากขึ้นรูพรุนจะมีสีที่ดูดซับมากขึ้น ทำให้เริ่มเกิดการคายซับ ส่งผลให้ร้อยละการบำบัดสีย้อมลดลงปรากฏการณ์นี้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่สัมผัส (Malik, 2003)

1.4 ศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาซันอ้อย (zeolite bagasse) และซีโอไลต์มาตรฐาน (zeolite 4A)



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จากผลการศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีเบสิกในน้ำเสียสังเคราะห์แสดงผลดังภาพที่ 22 พบว่า การดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาซันอ้อย ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ไม่แตกต่างจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดร้อยละ 98.94 ± 0.82 และการดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ไม่แตกต่างจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 98.92 ± 0.89 ส่วนการดูดซับสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาซันอ้อย ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ไม่แตกต่างจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 91.32 ± 0.87 และในการดูดซับสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 ไม่แตกต่างจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 87.85 ± 0.60 จากค่าความเป็นกรด-ด่าง 2 ถึง 10 โดยพบว่า การดูดซับโดยใช้ซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้ มีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเริ่มคงที่ เมื่อเข้าสู่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 4 ถึง 6 เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีความเป็นกรดสูง มีปริมาณ H^+ ที่สูงขึ้น จะเกิดการแข่งขันในการแลกเปลี่ยนประจุกับซีโอไลต์และสีเบสิก ในการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้เกิดการดูดซับได้น้อย แต่

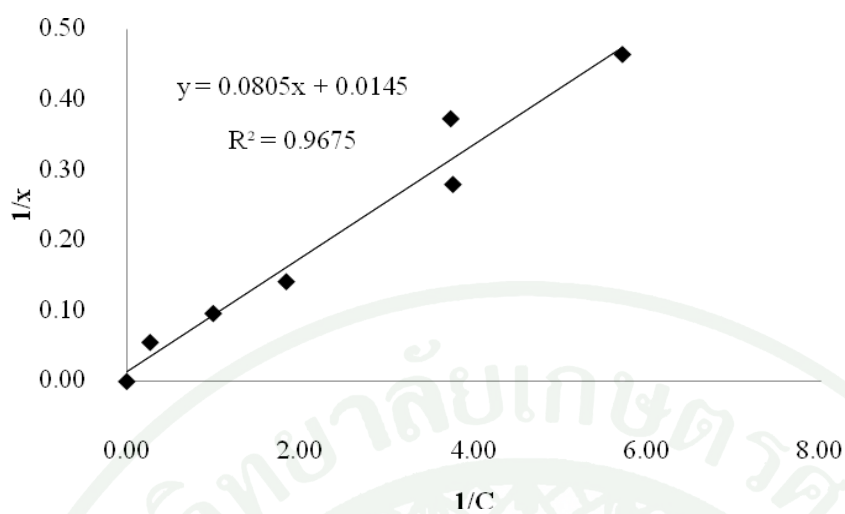
เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ปริมาณ H^+ จะลดลง ทำให้การเข้าดูดซับได้มากขึ้น (Wong *et al.*, 2009) และสารละลายสีขุ่นหลังจากทำการทดลอง พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น เนื่องจากตัวประจุลบเชิงลบเข้าไปแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ภายในตัวซีโอไลต์ ดังนั้น Na^+ ซึ่งมีค่าความเป็นด่างสูง เมื่อถูกปล่อยสู่น้ำเสียภายนอก ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสูงขึ้น (Majdan *et al.*, 2003) สามารถอธิบายปฏิกิริยาได้ ดังนี้



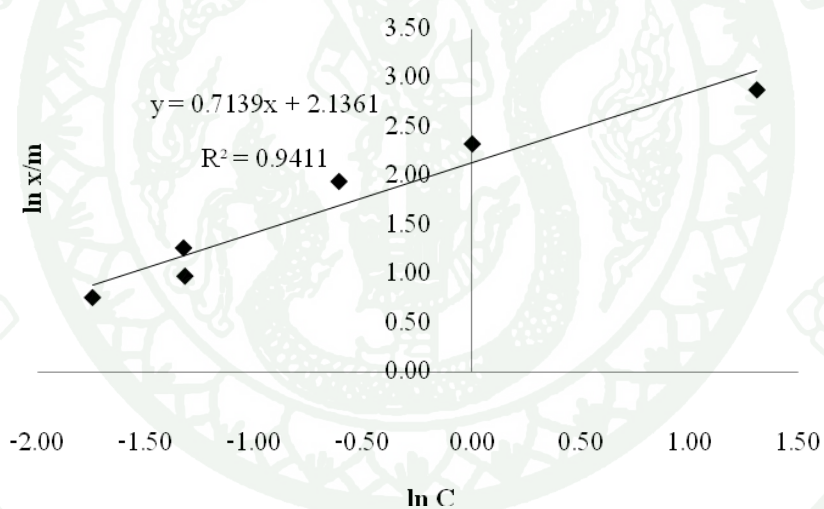
ดังนั้นการดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อยและซีโอไลต์มาตรฐาน ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 5 ถึง 10 ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้สูงสุด เท่ากับร้อยละ 99.71 ± 0.23 ส่วนสี Basic red 46 ถูกดูดซับได้สูงสุดเมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ตั้งแต่ 5 ถึง 10 โดยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดเท่ากับร้อยละ 90.91 ± 0.40

1.5 ศึกษารูปแบบในการดูดซับของซีโอไลต์

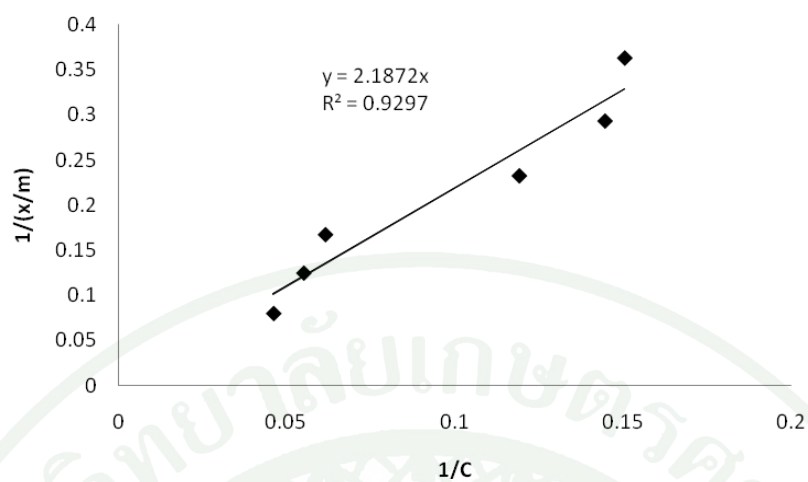
ในการทดลองนี้เป็นแบบการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำซานอ้อย เติมซีโอไลต์แบบผงปริมาณ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 0.8 และ 1 กรัม ลงในน้ำสีสังเคราะห์ชนิดเบสิก ได้แก่ Astrazon blue และ Basic red 46 ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อธิบายโดยสมการไอโซเทอมในการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ผลดังภาพที่ 25, 26, 27, 28 และตารางที่ 4



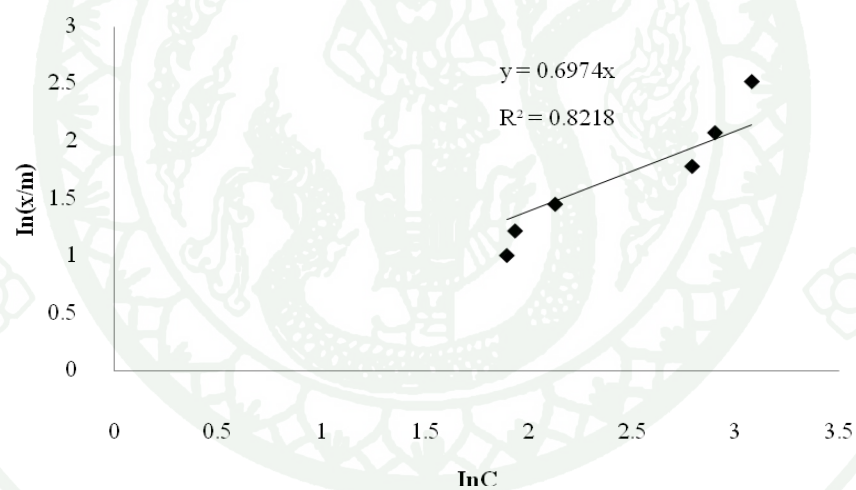
ภาพที่ 25 ไอโซเทอมในการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ของสี Astrazon blue



ภาพที่ 26 ไอโซเทอมในการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ของสี Astrazon blue



ภาพที่ 27 ไอโซเทอมในการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ของสี Basic red 46



ภาพที่ 28 ไอโซเทอมในการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ของสี Basic red 46

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิชและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวของสีย้อมโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยแบบผง

สีย้อม (Dyes)	ชนิดของสมการ ไอโซเทอมใน การดูดติดผิว	ค่าคงที่	ความสามารถใน การดูดติดผิวสูงสุด (มก/ก.)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R^2)
สี Astrazon blue	แลงเมียร์	$1/X_{mb} = 0.0805$	54.9	0.97
		$b = 5.55$		
		$K = 8.47$		
สี Basic red 46	ฟรุนดลิช	$1/n = 0.7139$	76.06	0.94
		$1/X_{mb} = 2.1872$		
	แลงเมียร์	$b = 0$	15.72	0.93
		$K = 1$		
		$1/n = 0.6974$		

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดของไอโซเทอมการดูดติดผิวของแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดติดผิวของฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในการดูดติดผิวของสีย้อมโดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐานทางการค้าแบบผง

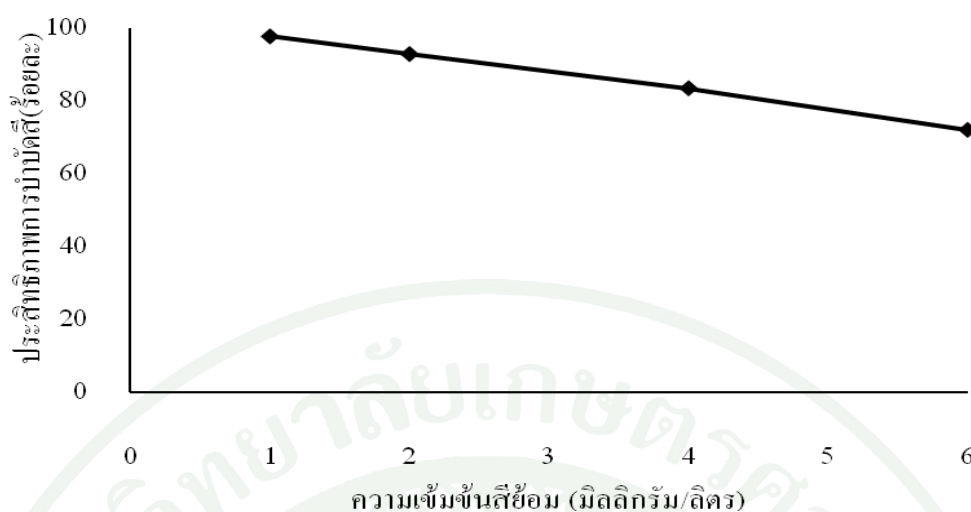
สีย้อม (Dyes)	ชนิดของสมการ ไอโซเทอมใน การดูดติดผิว	ค่าคงที่	ความสามารถใน การดูดติดผิวสูงสุด (มก/ก.)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R^2)
สี Astrazon blue	แลงเมียร์	$1/X_{mb} = 0.0741$	42.61	0.97
		$b = 0.27$		
	ฟรุนดลิช	$K = 11.25$	191.03	0.94
		$1/n = 0.9267$		
สี Basic red 46	แลงเมียร์	$1/X_{mb} = 1.153$	13.62	0.95
		$b = 0.03$		
	ฟรุนดลิช	$K = 1.12$	14.29	0.92
		$1/n = 0.7528$		

จากตารางที่ 4 แสดงค่าคงที่ตามแบบจำลองไอโซเทอม ค่าความสามารถในการดูดซับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามแบบจำลองทั้งสองแบบ เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์จากเถาวัลย์ โดยศึกษาการดูดซับสีย้อม 2 ชนิด คือสี Astrazon Blue และ Basic Red 46 พบว่า เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองของฟรุนดลิช ดังนั้นแบบจำลองของแลงเมียร์สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า จากผลการศึกษาพบว่า ในการดูดซับสี Astrazon blue ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.97 และ ในการดูดซับสี Basic red 46 ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.93 ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์จากเถาวัลย์ ในการดูดซับสีย้อมชนิด Astrazon Blue เท่ากับ 54.9 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ และดูดซับสีย้อมชนิด Basic Red46 เท่ากับ 15.72 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์

2. การศึกษาการจัดสีย้อมในระบบแบบต่อเนื่อง

2.1 ศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้ซีโอไลต์จากเถาวัลย์

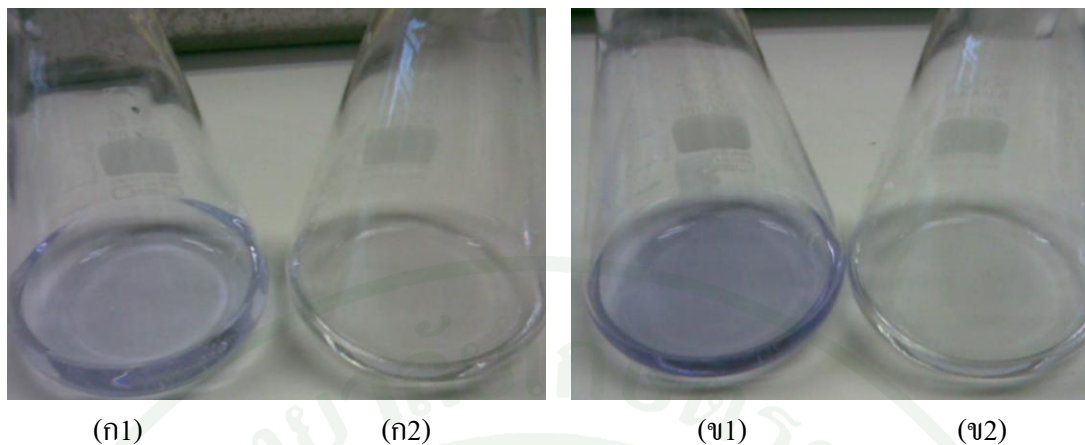
ผลการศึกษา เมื่อหาค่าการแปรผันความเข้มข้นของสีย้อมสังเคราะห์จากโรงงานชนิดเบสิกสีน้ำเงินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางให้มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 1, 2, 4 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุซีโอไลต์อัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 42 กรัม ลงในคอลัมน์และทำการผ่านไหลน้ำลงในคอลัมน์ที่อัตราการไหล 0.9 ลิตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บน้ำไปหาประสิทธิภาพในการบำบัดสี ได้ผลดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ความเข้มข้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม

ผลจากการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุด คือ ร้อยละ 92.94 ที่ความเข้มข้นของสี 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลง จากผลการทดลองนี้ ได้คัดเลือกผลของความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุด คือ ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากถ้าใช้น้ำสีย้อมที่ความเข้มข้นสี 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจาง และอาจทำให้ต้นทุนในการกำจัดเพิ่มสูงขึ้น

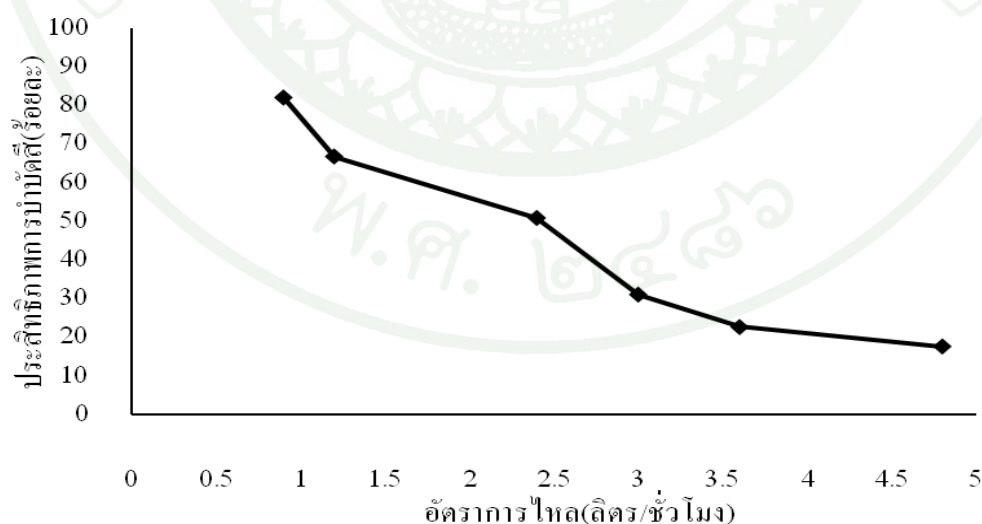
นอกจากนี้ น้ำสีย้อมที่ความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังผ่านการบำบัดแล้ว ให้สีไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นจึงเป็นเหตุสนับสนุนที่สามารถนำน้ำสีย้อมที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มาใช้แทนน้ำสีย้อมที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ผลของน้ำสีย้อมให้ผลดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 (ก1)น้ำสีความเข้มข้น 1 มก./ล. (ก2)น้ำสีหลังผ่านคอลัมน์ (ข1)น้ำสีความเข้มข้น 2 มก./ล. และ (ข2)น้ำสีหลังผ่านคอลัมน์

2.2 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการผ่านคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาซานอ้อย

ผลจากการศึกษาโดยการแปรผันอัตราการไหล ได้แก่ 0.9, 1.2, 2.4, 3.0, 3.6 และ 4.8 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ได้ผลดังภาพที่ 31

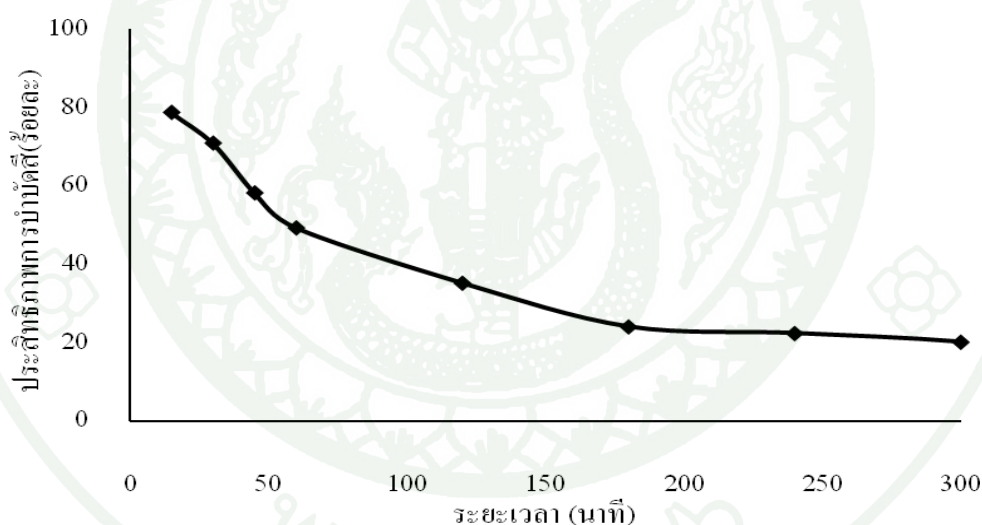


ภาพที่ 31 อัตราการไหลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี

จากภาพที่ 31 พบว่าที่อัตราการไหล 0.9 ลิตรต่อชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี เท่ากับ 82.03 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้น การบำบัดสีในระบบแบบต่อเนื่องจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเป็นการลดระยะเวลาสัมผัส ทำให้ความสามารถในการบำบัดสีลดลง และเนื่องจากซีโอไลต์ที่อัดเม็ดเริ่มอิ่มตัว จึงไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (สิรินันท์, 2550)

2.3 ศึกษาระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมในการผ่านคอลัมน์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย

จากการศึกษาการแปรผันระยะเวลาที่ใช้ในการผ่านคอลัมน์ ที่ 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของสีสังเคราะห์จากโรงงานที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 0.9 ลิตรต่อชั่วโมง ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ได้ผลดังภาพที่ 32

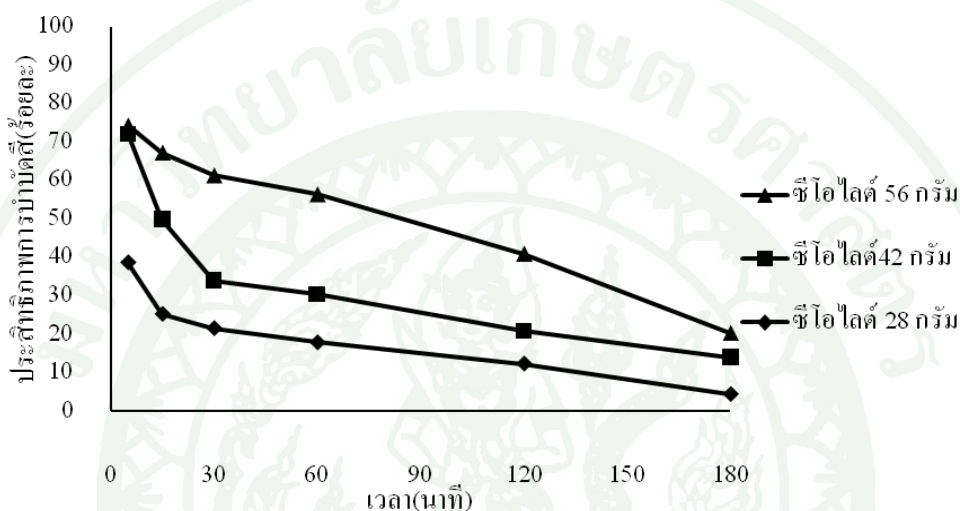


ภาพที่ 32 ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี

จากภาพที่ 32 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสี ได้ร้อยละ 76.29 ที่เวลา 15 นาที เนื่องจากซีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูปในตอนแรกมีโอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสูง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป โอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลงและมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับก็น้อยลงทำให้ความสามารถในการกำจัดสีลดลงจนเกือบคงที่ (สิรินันท์, 2550)

2.4 ศึกษาผลที่บรรจุในคอลัมน์ที่เหมาะสมในการผ่านคอลัมน์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากถ้ำซานอ้อย

จากการศึกษาการแปรผันมวลที่ใช้ในการบรรจุในคอลัมน์ ที่ 28, 42 และ 56 กรัม ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ได้ผลดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีกับมวลของซีโอไลต์อัดเม็ดที่บรรจุในคอลัมน์ที่มีมวลต่างกัน

จากภาพที่ 33 พบว่า มวลของซีโอไลต์อัดเม็ดที่บรรจุลงในคอลัมน์ที่ 56 และ 42 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีมากที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 74.29 และ 72.09 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยังใช้จำนวนซีโอไลต์ในการบรรจุในคอลัมน์มากขึ้น ก็จะเพิ่มความสามารถในการกำจัดสีได้มากขึ้น โดยซีโอไลต์จะเข้าไปแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับแคทไอออนของสียเบสิก จึงเลือกใช้มวล 42 กรัม ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 15 นาที

การวัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นสามารถหาได้ด้วยการใช้วิธีการวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) และการใช้วิธี S.U. โดยผลการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ได้ค่าไม่แตกต่างกัน ดังภาคผนวก ก แต่ในการวัดสีในน้ำเสียจริงนั้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยวิธีการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงก่อนและหลังบำบัดนั้นให้ค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่วัดสีโดยวิธี S.U. ในน้ำเสียก่อนและหลังบำบัด จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน สอดคล้องกับลักษณะสีปรากฏที่เห็นด้วยตาเปล่า

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยวิธีการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงและวิธี S.U. ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

	วิธีวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง		วิธี S.U.	
	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง		ค่าความเข้มสี	
น้ำเสียสังเคราะห์	Astrazon blue	Basic red	Astrazon blue	Basic red
ก่อนการดูดซับ	1.166	0.253	193.90	266.00
หลังการดูดซับ	0.024	0.050	2.5	26.85
น้ำเสียจริง	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง		ค่าความเข้มสี	
ก่อนการดูดซับ	0.142	0.224	394.45	
หลังการดูดซับ	0.155	0.238	89.30	

3. ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขาน้อยในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อม จ. แพร่ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง

3.1 การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า สภาวะที่เหมาะสม ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขาน้อย เท่ากับ 0.5 กรัม กวนผสมที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที เมื่อนำมาดูดซับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อม ได้ผลดังตารางที่ 7 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียเพิ่มขึ้นหลังจากทำการดูดซับ เนื่องจากว่า ตัวประจุบวกของสีเข้าไปแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ภายในซีโอไลต์ ดังนั้น Na^+ ซึ่งมีค่าความเป็นด่างสูง เมื่อถูกปล่อยสู่น้ำเสียภายนอก ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสูงขึ้น (Majdan *et al.*, 2003) โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสี เท่ากับร้อยละ 76.73 และประสิทธิภาพในการบำบัดสีโอดีได้ร้อยละ 72.41 เนื่องจากซีโอไลต์สามารถดูดซับโมเลกุลของสีได้ ซึ่งในตัวสีมีสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดค่าซีโอดีสูง

เนื่องจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อมถ้าใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบผงเป็นวัสดุดูดซับ ซีโอไลต์จะปนไปกับน้ำ ทำให้การกำจัดเก็บหลังจากใช้แล้วทำได้ยาก ต้องนำมารองก่อนถึงจะนำไปกำจัดได้ ดังนั้นซีโอไลต์ในรูปแบบผงไม่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ จึงนำซีโอไลต์ใน

รูปแบบผงมาทำการผ่านขึ้นรูปเป็นเม็ดขนาด 2 มิลลิเมตร (สมเนตร, 2554) มาใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง

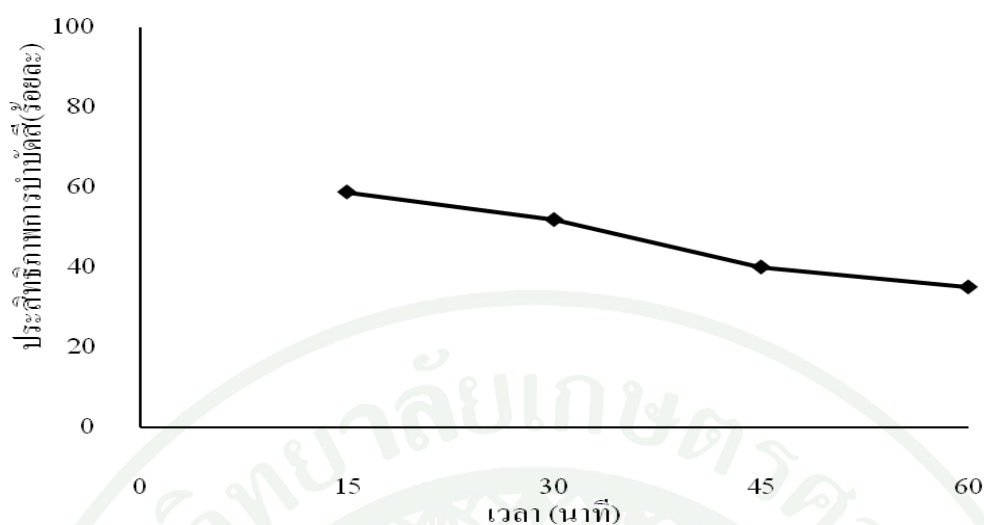
3.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Test)

จากสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีในการทดลองแบบต่อเนื่อง ความเข้มข้นสีที่ป้อนผ่านคอลัมน์ คือ ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยป้อนที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.9 ลิตรต่อ นาที โดยมวลสีโพลีแอคทีฟเม็ดที่บรรจุลงในคอลัมน์เท่ากับ 42 กรัม เมื่อนำมาดูดซับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อส้ม ได้ผลดังตารางที่ 7 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับร้อยละ 58.82 และสามารถกำจัดซีไอได้ ร้อยละ 86.05

เนื่องจากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่เสนอแนะสำหรับโรงงานฟอกย้อม ที่ระบายลงสู่แหล่งน้ำ (ภาคผนวก ข) มีการกำหนดค่าซีไอของโรงงานฟอกย้อมไว้ไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำเสียจากสีฟอกย้อมกลุ่มสิ่งทอม่อส้มมีค่าซีไอเท่ากับ 344 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐาน เมื่อได้รับการบำบัดโดยใช้ซีโพลีแอคทีฟจากถ้ำซานฮวยทั้งในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง ทำให้ค่าซีไอลดลงอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำทิ้งคือ 94.95 และ 48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอเท่ากับร้อยละ 72.41 และ 82.05

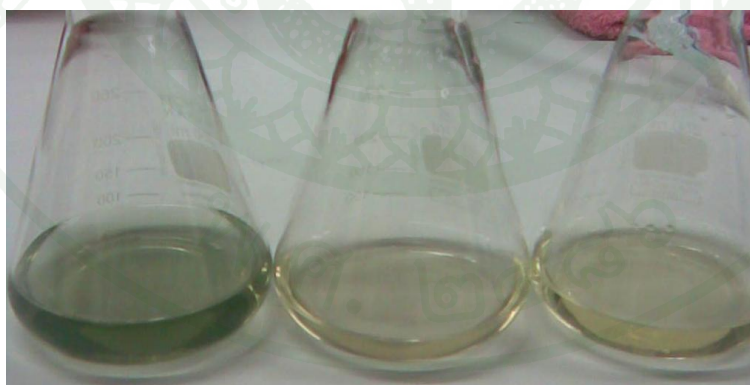
ตารางที่ 7 ผลของประสิทธิภาพในการดูดซับสีจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อส้มในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และ แบบต่อเนื่อง (Continuous Test)

ตัวแปร	ระบบแบบไม่ต่อเนื่อง	ระบบแบบต่อเนื่อง
	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD
pH เริ่มต้น	7.73 $\pm$ 0.12	7.73 $\pm$ 0.12
pH หลังดูดซับ	8.6 $\pm$ 0.15	9.4 $\pm$ 0.25
ซีไอเริ่มต้น (ไม่กรอง)	3,070.13 $\pm$ 2.65	3,070.13 $\pm$ 2.65
ซีไอเริ่มต้น (กรอง)	344.14 $\pm$ 1.09	344.14 $\pm$ 1.09
ซีไอหลังดูดซับ	94.95 $\pm$ 1.74	48.0 $\pm$ 5.14
ร้อยละการกำจัดซีไอ	72.41 $\pm$ 0.15	86.05 $\pm$ 1.4
ร้อยละการบำบัดสี	76.73 $\pm$ 1.71	58.82 $\pm$ 1.48



ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงและเวลาในการกักเก็บน้ำหลังจากผ่านคอลัมน์

จากภาพที่ 34 พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย หลังจากน้ำผ่านคอลัมน์จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไป เนื่องจากชีโอไลต์ที่ผ่านการขึ้นรูปในตอนแรกมีโอกาสนในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสูง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป โอกาสในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลงและพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับก็น้อยลงทำให้ความสามารถในการกำจัดสืลดลงจนเกือบคงที่ (สิรินันท์, 2550)



(1)

(2)

(3)

ภาพที่ 35 น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อม (1) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง (2) และแบบต่อเนื่อง (3)

สรุปและข้อเสนอแนะ

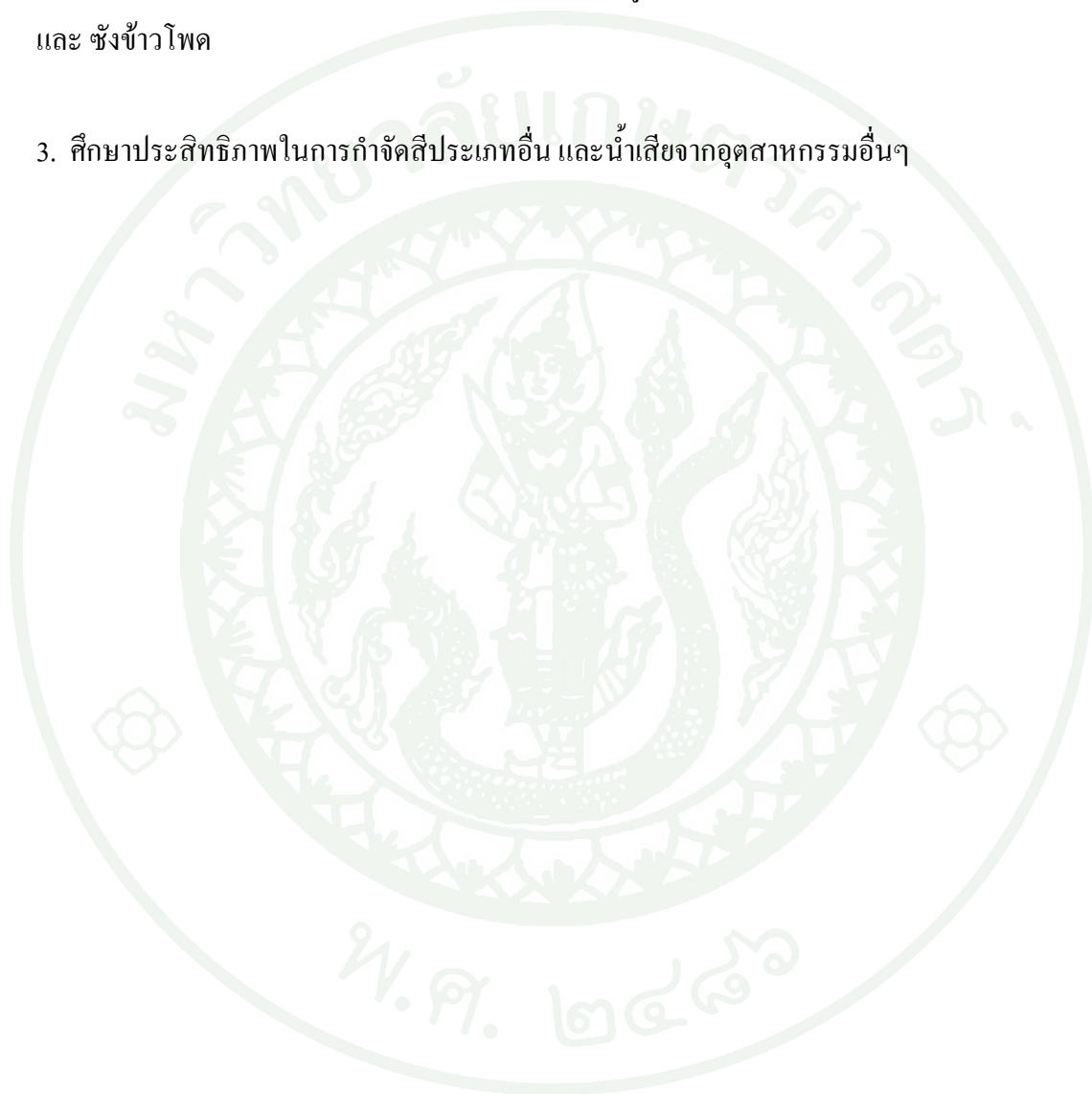
สรุป

จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมชนิดเบสิกโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาหาสภาวะในการบำบัดสี Astrazon blue โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าชานอ้อย และซีโอไลต์มาตรฐาน ให้ผลไม่แตกต่างกัน โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณซีโอไลต์ 0.5 กรัม น้ำสีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 98.94 และ 98.43 ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าชานอ้อย คือ ปริมาณซีโอไลต์ 0.8 กรัม น้ำสีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 89.73 และการบำบัดสี Basic red 46 โดยใช้ซีโอไลต์มาตรฐาน คือ ปริมาณซีโอไลต์ 0.8 กรัม น้ำสีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ระยะเวลาสัมผัส 180 นาที สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 79.23
2. การดูดซับสีประเภทเบสิกด้วยซีโอไลต์จากเถ้าชานอ้อยเป็นไปตามสมมูลการดูดซับแบบแลงเมียร์ ให้ค่าการดูดซับสี Astrazon blue และ Basic red 46 สูงสุด เท่ากับ 54.9 และ 15.72 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์
3. เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 2. มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ม่อฮ่อมแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีร้อยละ 76.73 และสามารถบำบัดสีโอดีได้ร้อยละ 72.41
4. ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ม่อฮ่อม แบบต่อเนื่องโดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าชานอ้อย พบว่า ความเข้มข้นของน้ำสีย้อม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยป้อนน้ำไหลผ่านคอลัมน์ที่มีมวลซีโอไลต์บรรจุเท่ากับ 42 กรัม ที่อัตราการไหล 0.9 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 78.77 และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีร้อยละ 58.82 และสามารถบำบัดสีโอดีร้อยละ 86.05

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่
2. ทดลองทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น จีเลื่อย ตะกรันเหล็ก และ ชังข้าวโพด
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีประเภทอื่น และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมฟอกย้อม.
กรุงเทพฯ.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2542. คู่มือผู้ควบคุม
และปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน. ม.ป.ท.. กรุงเทพฯ.

กุลวดี รังสีพัฒนานนท์. 2545. การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์เพื่อเป็น
สารแลกเปลี่ยนไอออนแอมโมเนีย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. โรง
พิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จารุทัศน์ มลิณะเลข. 2537. การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ไชยวัฒน์ รงค์สยามานนท์. 2548. การปรับปรุงเม็ดซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยลิกไนต์เพื่อ
กำจัดแอมโมเนีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1
กรุงเทพมหานคร. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

นิภัทร เปี่ยมอรุณ. ม.ป.ป. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่ง
ปฏิกิริยา ซีโอไลต์ 1. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

ประรัชกรณ์ สาริตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีดอกกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัญญา เศษฐา. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยใช้แอคติเวเตดคาร์บอน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะ ปุณณินทร. 2545. การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำโดยใช้ไฮโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ไฮโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวศน์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

เรวดี อนุวัฒนา. 2544. การสังเคราะห์ไฮโอไลต์จากตะกอนหลักคิวโปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.

เรวดี อนุวัฒนา. 2551. โครงการพัฒนาเทคโนโลยีในการสังเคราะห์และขึ้นรูปไฮโอไลต์จากเศษขาน้อยเพื่อใช้ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

วชิรพงศ์ โกสิน. 2549. ขั้นตอนการทำเสื้อผ้าม่อฮ่อม. <http://www.thunghong.org/about.htm>.

วิไลพร วนิชย์โรดม. 2536. การบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอกติเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริอุมา บำรุงวงศ์. 2541. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย. 2550. โครงการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวเคมีที่ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบต้นน้ำ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย. 2535. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. กรุงเทพฯ.

สมชาย เอกธรรมสุทธิ. 2514. การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าโดยวิธีการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมเนตร จันทวิชชประภา. 2554. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะหนักโดยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเศษขานอ้อยแบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สัญญาถ สันธวราชัน และสมชาย พานิชสาส์น. 2540. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ถ่านหิน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิรินันท์ กันศิริ. 2550. การกำจัดซีโอติในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย เพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉราพร ไสละสุต. 2519. วิศวกรรมสิ่งทอ. ภาควิชาอุตสาหกรรมศาสตร์, คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ วิทยาลัยเทคโนโลยีอาชีวศึกษา, กรุงเทพฯ.

อานนท์ เศรษฐเกียรติกร และ เกศณี เสมมีสุข. 2551. น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม:ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมฟอกย้อมพิมพ์และตกแต่งสิ่งทอ. www.thailandindustry.com/home/news. 1 ตุลาคม 2551.

Abraham, R. 1996. **Environmental Chemistry of Dyes and Pigment**. Acid free paper. 1-70.

- Bhatia, S. 1990. **Zeolite Catalysis: Principle and Applications**. CRC Press,inc., Boca Raton, Florida. 290 p.
- Breck, D.W. 1974. **Zeolite Molecular Sieve : Structure, Chemistry, and Use**. New York : John Wiley&Son.
- Buckley, C.A. 1992. **Membrane technology for the treatment of dye house effluents**. Water Sci.Technol. 25: 203-209.
- Dyer, A. 1988. **An Introduction to Zeolite Molecular Sieves**. Jhon Wiley & Sons inc.. New York. 149 p.
- Ghash, M.M., F.E. Woodard, O.J. Sproul, P.B. Knowlton and F.D. Gverton. 1978. **Treatability Studies and Design Considerations for Textile Wastewater**. Water and Waste Eng. 1(4): 35-41.
- Jain, C. K., Arvind Kumar and I. M. Hayssam. 2009. **Color removal from paper mill effluent through adsorption technology**. Environ. Monit. Asses. 149:343-348.
- Janos, P., H. Buchtova and M. Ryznorova. 2003. **Sorption of dyes from aqueous solution onto fly ash**. Water Res. 37: 4938–4944.
- Kannan, N and M.M. Sundaram. 2001. **Kinetics and Mechanism of removal of Methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study**. Dyes Pigments. 51: 25-40.
- Lin, C.F and H.C. Hsi, 1995. **Resorce Recovery of Waste Fly ash: Synthesis of Na A zeolite – like Matherials**. Environmental Science & Technology. 29 (4): 1109-1117.

- Majdan, M., S. Pikus, M.K. owalska-Ternes, A. Gladysz-Plaska, P. Staszczuk, L. Fuks, H. Skrzypek. 2003. **Equilibrium study of selected divalent d- electron metals adsorption on A-type zeolite.** Journal of colloid and Interface Sci. 262: 321-330.
- Malik, P.K. 2003. **Use of activated carbons prepared from sawdust and rice- husk for adsorption of acid dyes : A case study of Acid Yellow 36.** Dyes pigments. 56: 239-249.
- Mckey, G. 1979. **Waste color Removal From Textile Effluents.** American Dyestuff Reporter.
- Nur, H. 2001. **Direct synthesis of Na A zeolite from rice husk and carbonaceous rice husk ash.** Indonesian Journal of Agricultural Science. 40-45.
- Ong, S.T., C.K. Lee and Z. Zainal. 2006. **Removal of Basic and Reactive dyes using Ethylenediamine modified rice hull.** Bioresource Technology. 98: 2792-2799.
- Ozdemir, O., M. Turan, A.Z. Turan, A. Faki and A.B. Engin. 2009. **Feasibility analysis of color removal from textile dyeing wastewater in a fixed-bed column system by surfactant-modified zeolite (SMZ).** Journal of Hazardous Materials. 166: 647-654.
- Sawyer, C.N and P.L. McCarty. 1978. **Chemistry for environmental Engineering.** 3 rd. McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Szostak, R. 1989. **Molecular Sieve Principle of Synthesis and Identification.** Van Nostrand Reinold, New York. 51-126 p.
- Wong, S.Y., Y.P. Tan, A.H. Abdullah and S.T. Ong. 2009. **The Removal of Basic and Reactive Dyes Using Quartenised Sugar Cane Bagasse.** Journal of Physical Science, Vol.20 (1): 59-74.
- Vigo, T.L. 1994. **Textile Processing and Properties.** Elsevier, New York. 415 p.





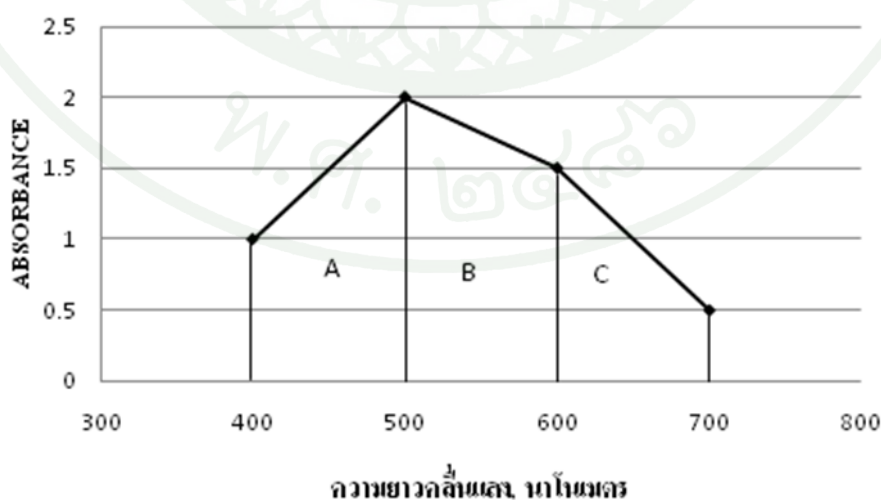
การวัดสี

1. การวัดสีด้วยหน่วยเอสยู (SU)

ชุดวัดสีแบบสนาม (Test kit) ที่ใช้ทั่วไปเหมาะสมสำหรับน้ำธรรมชาติที่มีสีเหลืองชาเท่านั้น ส่วนวิธี ADMI ที่ใช้วัดสีก็เป็นวิธีที่ยุ่งยากและต้องใช้อุปกรณ์ราคาแพง ในปัจจุบัน จึงได้มีวิธีวัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ง่าย สะดวก และให้ข้อมูลที่มีความหมาย คือ การวัดสีแบบเอสยู (space unit) วิธีนี้เป็นการวัด Absorbance (A) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร และคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเป็นค่า S.U. ช่วงคลื่นดังกล่าวเป็นของสีต่างๆที่ตามองเห็นดังนั้นค่า S.U. จึงใช้ได้กับทุกสี สีที่เข้มมากก็จะดูดกลืนแสงมากทำให้ได้ค่า A สูง (มันสิน, 2547)

1.1 หลักการ

การวัดสีแบบเอสยู (S.U.=space unit) เป็นหน่วยการวัดสีโดยการวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (400-700 นาโนเมตร) โดยใช้วิธีวัดช่วงละ 100 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ โดยให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงเป็นแกนตั้ง และความยาวคลื่นแสงในหน่วยนาโนเมตรเป็นแกนนอน จากนั้นคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ พื้นที่ที่ได้เท่ากับหน่วยเอสยู ดูภาพผนวกที่ ก1



ภาพผนวกที่ ก1 การวัดสีโดยใช้วิธี Space Unit (S.U.)

จากตัวอย่างภาพที่ คำนวณพื้นที่ใต้กราฟ

$$\begin{array}{rclcl} A & = & (1+2)*100/2 & = & 150 \\ B & = & (2+1.5)*100/2 & = & 175 \\ C & = & (1.5+0.5)*100/2 & = & 100 \end{array}$$

รวมพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด = $A+B+C$ = 425 หน่วยเอสยู

ดังนั้น สีในตัวอย่างมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 425 หน่วยเอสยู

2. ผลการดูดซับสีสังเคราะห์โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในระบบแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้วิธีการหาค่าดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) และวิธีเอสยู (space unit)

ผลการดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้วิธีการหาค่าดูดกลืนคลื่นแสง เมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้มวลซีโอไลต์ 0.5 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม เท่ากับ ร้อยละ 98.77 ส่วนการดูดซับสี Basic red ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้มวลซีโอไลต์ 0.8 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม เท่ากับ ร้อยละ 90.24

ผลการดูดซับสี Astrazon blue โดยใช้วิธีการเอสยู (space unit) เมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้มวลซีโอไลต์ 0.5 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม เท่ากับ ร้อยละ 98.71 ส่วนการดูดซับสี Basic red ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้มวลซีโอไลต์ 0.8 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 240 นาที ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม เท่ากับ ร้อยละ 89.91

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม เมื่อใช้วิธีการหาค่าดูดกลืนคลื่นแสง และวิธีเอสยู ให้ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน

3. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในระบบแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องโดยวิธีเอสยู (space unit)

ตารางผนวกที่ ก1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อต่อมในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยวิธีเอสยู

ตัวแปร	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ร้อยละในการกำจัดซีโอดี	71.73	72.64	72.26	72.41
ร้อยละในการบำบัดสีย้อม	77.40	78.00	74.79	76.73

ตารางผนวกที่ ก2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อต่อมในระบบแบบต่อเนื่อง โดยวิธีเอสยู

ตัวแปร	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ร้อยละในการกำจัดซีโอดี	86.98	86.80	84.38	86.05
ร้อยละในการบำบัดสีย้อม	58.02	55.92	57.59	58.82

การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม

1) เตรียมความเข้มข้นของสีเบสิก ได้แก่ สี Astrazon blue FGGL 300% และสี Basic red 46 ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำมาวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) ที่มีความยาวคลื่น ในช่วง 400-700 นาโนเมตร

2) นำข้อมูลที่ได้ มาสร้างกราฟระหว่างการดูดกลืนคลื่นแสง (absorbance) กับความยาวคลื่น (λ) และหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุด (λ_{max})

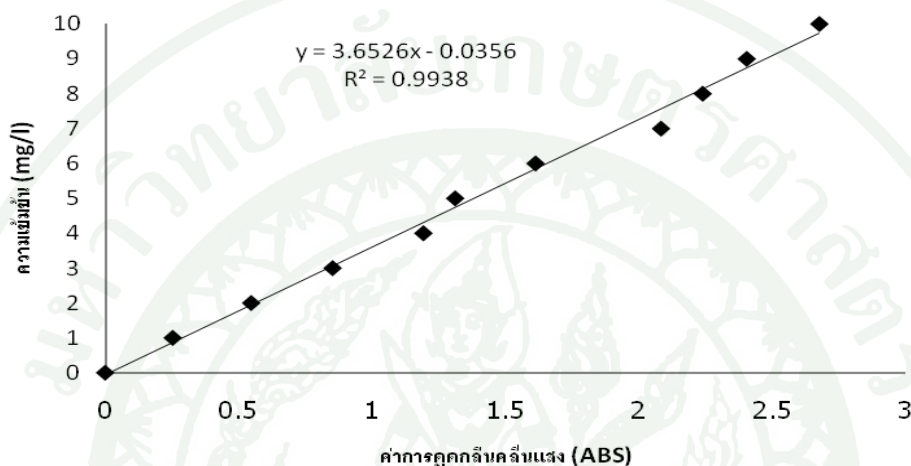
การสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard Curve)

1) เตรียมความเข้มข้นของสีที่มีความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำไปวัดหาค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด

- 2) นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนคลีนแสงกับความเข้มข้นของสี

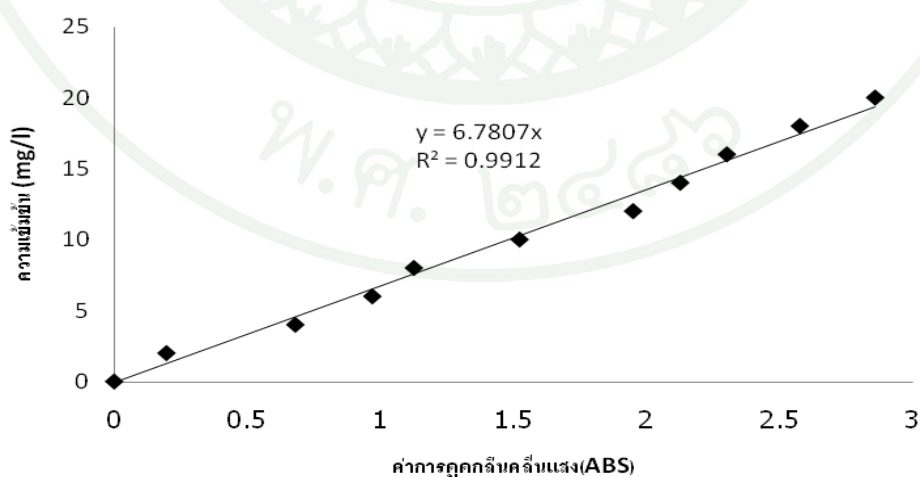
กราฟมาตรฐานในการทดลอง

1. สี Astrazon blue FGGL 300% ได้ค่าวัดการดูดกลืนคลีนแสงสูงสุดที่ 605 นาโนเมตร

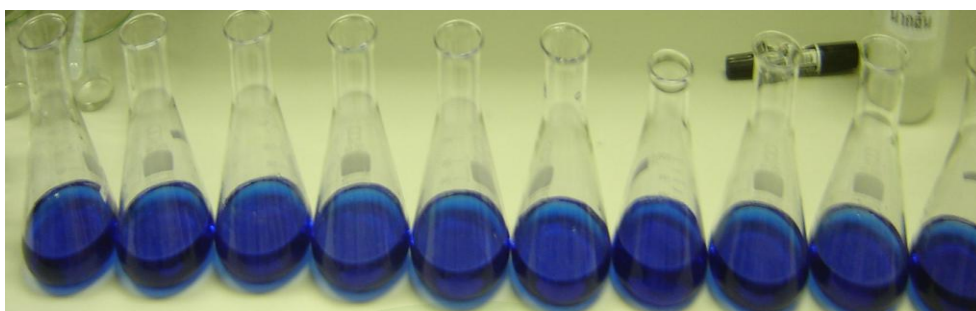


- ภาพผนวกที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีและค่าการดูดกลืนคลีนแสงของสี
Astrazon blue FGGL 300%

2. สี Basic red 46 ได้ค่าวัดการดูดกลืนคลีนแสงสูงสุดที่ 533 นาโนเมตร



- ภาพผนวกที่ ก3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีและค่าการดูดกลืนคลีนแสงของ
สี Basic red 46



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ก4 การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างไม่มีผลต่อสีข้อมในการทดลอง (ก) น้ำสีสังเคราะห์ Astrazon blue ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 2-10 และ (ข) น้ำสีสังเคราะห์ Basic red 46 ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 2-10



ตารางที่ ข1 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เสนอแนะสำหรับโรงงานฟอกย้อม ที่ระบายลงสู่แหล่งสาธารณะ

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้งที่เสนอแนะ	มาตรฐานน้ำทิ้งปัจจุบัน
บีโอดี	< 40	< 60
ซีโอดี	< 300	< 400
ของแข็งแขวนลอย	< 50	< 50
พีเอช	6.5-9.0	6.5-9.0
ปริมาณซีโอดี	ยังไม่ควรกำหนด	ยังไม่ควรกำหนด

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (chemical Oxygen Demand)

ค่าซีโอดี หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการ oxidize สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100 %) จะถูก oxidize โดยตัวเดิมออกซิเจนอย่างแรง (strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการที่ 1



การวิเคราะห์หา COD แบบ Close Reflux, Titrimetric Method

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 25 x 150 มม. พร้อมจุก TFE
- 2) ที่ใส่หลอดทดลอง
- 3) เตาอบ (oven) ที่อุณหภูมิ $150 \pm 2^\circ C$.
- 4) ปิเปตขนาด 1,10 มล.
- 5) บิวเรตขนาด 50 มล.
- 6) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

2. รีเอเจนต์

1) สารละลาย digestion reagent

ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 4.913 กรัม ซึ่งอบแห้งที่ $103^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชม. ในน้ำกลั่น 500 มล. ค่อยๆ เติม conc. H_2SO_4 167 มล. เติม $HgSO_4$ ลงไป 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

2) กรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม $AgSO_4$ (Sulfuric Acid reagent)

ละลาย $AgSO_4$ 22 กรัมใน Conc. H_2SO_4 ซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ละลาย

3) สารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate (FAS) 0.1 N

ละลาย $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 39 กรัมในน้ำกลั่น แล้วเติม conc. H_2SO_4 ลงไป 20 มล. ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย digestion reagent ดังนี้ คือ เติมน้ำกลั่น 10 มล. สารละลาย digestion reagent 14 มล. จากนั้นใช้ปิเปตค่อยๆ เติม Sulfuric Acid reagent ลงไป 14 มล. ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลาย Ferrous ammonium sulfate (FAS) โดยใช้ ferroin จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าม่วงเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

$$\text{Normality of FAS solution} = \frac{\text{ml } K_2Cr_2O_7}{\text{ml } Fe (NH_4)_2(SO_4)_2} \times 0.10$$

4) สารละลาย ferroin อินดิเคเตอร์ วิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1

3. วิธีการทดลอง

1) ล้างหลอดทดลอง และฟาจุกด้วยกรด H_2SO_4 20 % ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์

2) ปิเปตตัวอย่างนำมา 10 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติม digestion reagent ลงไป 6 มล.

3) ค่อย ๆ เติม กรด sulfuric เข้มข้นที่ผสม AgSO_4 ลงไป 14 มล. ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของน้ำตัวอย่างและ digestion reagent

หมายเหตุ ภายหลังการเติมกรดซัลฟิวริก ให้สังเกตสีของตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ถ้าได้สีเขียว แสดงว่าปริมาณ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ เหลืออยู่มาก ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยเกินไป
- ต้องเพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่างอีก
- ถ้าได้สีเขียวอมเหลือง แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างเหมาะสม สามารถนำตัวอย่างไป

รีฟลักซ์ได้

- ถ้าได้สีเขียวอมฟ้า แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างมากเกินไป ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง ให้มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้ โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำตัวอย่าง : น้ำกลั่น เท่าไหร่ก็ได้ แต่ผลรวมของปริมาตรน้ำตัวอย่างต้องเท่ากับ 10 มล.

4) ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งอย่างทั่วถึงก่อนจะนำตัวอย่างไปรีฟลักซ์ เพื่อป้องกัน ไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่ที่ก้นหลอด ซึ่งอาจแตกได้ในขณะที่ทำการรีฟลักซ์

5) ให้ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่น แทนน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง ประมาณ 1-2 หลอด

6) นำหลอดแก้วทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและ Blank วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง แล้วเข้าเตาอบที่ทำให้อุณหภูมิสูงถึง 150 ± 2 องศาเซลเซียส ก่อนหน้านั้นแล้ว เมื่อครบเวลา 2 ชั่วโมง ให้นำตัวอย่างออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น

7) เทตัวอย่างจากหลอดใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลาย FAS จนกระทั่งถึงจุดยุติ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

สารแขวนลอย (suspended solids)

สารแขวนลอยหรือ เอสเอส หมายถึง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองได้ด้วย กระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/C) เอสเอสมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (สมาคม วิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย, 2543)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
2. กรวยบุคเนอร์ ความจุ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. เครื่องดูดอากาศ
4. เตาอบแห้ง
5. โถทำแห้ง (desicator)
6. เครื่องชั่งอย่างละเอียด

วิธีวิเคราะห์

1. อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมติว่าเป็น A มิลลิกรัม
2. เลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ ซึ่งจะให้ค่าของแข็งซึ่งได้โดยประมาณอย่างน้อยที่สุด 2.5 มิลลิกรัม (เพิ่มจากน้ำหนักของกระดาษกรอง)
3. วางกระดาษกรองลงในกรวยบุคเนอร์ ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ
4. ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกและให้ถูกดูดติดแน่นกับกรวยบุคเนอร์
5. กรองตัวอย่างน้ำตามปริมาตรที่ต้องการโดยอาศัยแรงดูดช่วย
6. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรอนจนกว่าจะแห้ง

7. ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้ปากคีบคีบ คีบกระดาษกรองใส่ภาชนะทนไฟ เช่น จานเพาะเชื้อ ถ้วยอะลูมิเนียม หรือกระเจกนาฬิกา นำไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้ง ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

8. ทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนักกระดาษกรองใหม่ สมมติว่าเป็น B มิลลิกรัม

การคำนวณ

เอสเอสหรือสารแขวนลอย, มก./ลบ.คม.

$$= \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (B-A) x 1,000}}{\text{ลบ.ชม. ตัวอย่างน้ำ}}$$



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบการหาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีของซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยในการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

ตารางผนวกที่ ค1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon Blue โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์
สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ โดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง

ปริมาณซีโอไลต์	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	88.475	79.05	81.22	82.92
0.2	95.22	95.39	95.48	95.36
0.3	96.17	95.05	93.39	94.87
0.4	98.90	98.81	99.56	99.20
0.5	99.11	99.15	99.56	99.27
0.6	98.68	99.48	97.06	98.41
0.8	98.59	97.23	98.89	98.24
1.0	99.20	98.73	99.65	99.19
1.5	96.69	99.48	97.81	97.53
2.0	95.74	97.81	96.98	96.84
2.5	98.42	98.23	96.06	98.38
3.0	99.20	97.56	98.39	98.38
3.5	97.86	98.23	96.89	97.66
4.0	97.21	95.48	85.47	92.16

ตารางผนวกที่ ค2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon blue โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาท)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	90.89	87.01	87.49	88.46
6	92.94	90.51	91.12	91.52
10	93.65	94.81	93.88	94.11
20	94.89	96.41	96.02	95.77
30	99.53	98.31	98.56	98.80
40	99.71	98.91	99.01	99.21
60	99.18	97.51	97.65	98.11

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

เวลา (นาท.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
90	99.89	97.51	98.05	98.48
120	99.62	99.41	99.26	99.43
150	99.00	99.15	99.18	99.11
180	98.81	99.01	99.44	99.09
240	98.73	98.21	98.99	98.64
330	99.80	99.81	99.17	99.59
360	98.73	99.61	98.54	98.96

ตารางผนวกที่ ค3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon blue โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	99.94	99.48	99.82	99.75
20	99.98	99.58	98.79	99.45
40	97.72	98.45	97.94	98.04
60	96.00	97.87	97.91	97.26
80	98.48	98.37	97.68	98.18
100	97.59	97.31	96.80	97.23
120	86.77	85.18	86.43	86.13
140	87.86	87.78	86.33	87.32
160	89.18	89.50	86.13	88.27
180	86.60	88.39	87.42	87.47
200	87.13	84.37	85.14	85.55

ตารางผนวกที่ ค4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon blue โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10

พีเอช	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	15.50	17.04	24.78	21.95
3	96.58	82.02	84.52	90.25
4	97.59	99.45	99.60	98.88
5	99.94	98.51	98.39	98.95
6	99.83	99.97	98.49	99.43
7	99.75	99.87	98.91	99.51
8	99.79	98.62	98.17	98.86
9	99.86	99.82	99.44	99.71
10	99.63	99.61	99.55	99.60

ตารางผนวกที่ ค5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Basic red 46 โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ จากถ้ำซานอ้อยที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณซีโอไลต์(ก.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	40.71	36.36	40.71	39.26
0.2	46.24	48.81	46.64	47.23
0.3	52.57	55.73	55.73	54.68
0.4	66.40	67.98	67.39	67.26
0.5	68.77	70.36	68.77	69.30
0.6	74.31	75.49	74.90	74.90
0.8	79.84	81.42	81.23	80.83
1.0	80.63	79.45	79.84	79.97
1.5	81.82	77.47	77.07	78.79
2.0	82.21	80.63	78.66	80.50

ตารางผนวกที่ ค5 (ต่อ)

ปริมาณซีโอไลต์(ก.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
2.5	80.24	81.82	80.04	80.70
3.0	79.45	79.84	79.64	79.64
3.5	79.84	75.10	75.69	76.88
4.0	78.66	75.89	75.49	76.68

ตารางผนวกที่ ค6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาท.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	13.83	13.04	13.45	13.44
6	25.30	25.14	25.22	25.22
10	27.27	26.88	27.09	27.08
20	36.76	37.40	37.08	37.08
30	42.69	41.10	41.91	41.90
40	49.01	49.12	49.08	49.07
60	55.73	54.94	55.35	55.34
90	55.96	56.84	56.38	56.34
120	61.16	61.80	60.29	61.39
150	66.40	66.20	66.30	66.30
180	72.35	71.84	72.27	72.95
240	81.45	81.16	80.92	81.10
330	80.24	79.74	80.61	80.37
360	80.63	80.23	80.43	80.43
420	80.39	80.33	80.74	80.10

ตารางผนวกที่ ค7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	84.73	85.26	86.31	85.43
20	84.8	82.40	84.00	83.73
40	75.96	79.52	79.94	78.47
60	69.00	72.62	71.59	71.07
80	67.37	71.47	69.46	69.43
100	74.46	71.00	71.26	72.24
120	68.03	66.43	65.47	66.64
140	66.69	65.18	66.57	66.15
160	70.18	68.80	67.43	68.80
180	70.64	70.18	67.43	69.42
200	66.28	66.40	65.60	66.09

ตารางผนวกที่ ค8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10

พีเอช	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	15.29	16.60	15.96	15.95
3	53.72	54.15	53.95	53.94
4	85.77	86.96	86.38	86.37
5	90.51	91.30	90.92	90.91
6	87.61	87.19	88.42	87.74
7	89.46	87.92	88.65	88.68
8	89.80	89.33	89.58	89.57
9	90.37	90.18	89.95	90.16
10	83.40	83.26	83.14	83.27

ตารางผนวกที่ ๙ ปริมาณสีย้อม Astrazon blue ในน้ำสีสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยแบบผง

น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ C(mg/l)	c (mg)	x(mg)	x/m(mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีย้อม(%)
0	21.6400	2.164	0.000						
0.1	3.7120	0.371	1.793	17.928	1.312	2.886	0.269	0.056	82.85
0.2	1.0029	0.100	2.064	10.319	0.003	2.334	0.997	0.097	95.37
0.3	0.5434	0.054	2.110	7.032	-0.610	1.950	1.840	0.142	97.49
0.6	0.2658	0.027	2.137	3.562	-1.325	1.270	3.762	0.281	98.77
0.8	0.2676	0.027	2.137	2.672	-1.318	0.983	3.737	0.374	98.76
1	0.1749	0.017	2.147	2.147	-1.744	0.764	5.718	0.466	99.19

ตารางผนวกที่ ค10 ปริมาณของสีย้อม Basic red 46 ในน้ำสีย้อมสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยแบบผง

น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ C(mg/l)	c (mg)	x(mg)	x/m(mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีย้อม(%)
0	34.17	3.417	0.000						
0.1	21.70	2.170	1.247	12.470	3.077	2.523	0.046	0.080	36.49
0.2	18.17	1.817	1.600	8.000	2.900	2.079	0.055	0.125	46.82
0.3	16.27	1.627	1.790	5.967	2.789	1.786	0.061	0.168	52.39
0.6	8.40	0.840	2.577	4.295	2.128	1.457	0.119	0.233	75.42
0.8	6.92	0.692	2.725	3.406	1.934	1.226	0.145	0.294	79.75
1	6.65	0.665	2.752	2.752	1.895	1.012	0.150	0.363	80.54

ตารางผนวกที่ ค11 ปริมาณของสี Astrazon blue ในน้ำสีข้อมที่สกัดเมื่อถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์มาตรฐานชนิด A แบบผง

น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นสีข้อมที่เหลื C(mg/l)	c (mg)	x(mg)	x/m(mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีข้อม(%)
0	21.24	2.124	0.000						
0.1	1.36	0.136	1.988	19.880	0.307	2.990	0.735	0.050	93.60
0.2	0.95	0.095	2.029	10.145	-0.051	2.317	1.053	0.099	95.53
0.3	0.84	0.084	2.040	6.800	-0.174	1.917	1.190	0.147	96.05
0.6	0.24	0.024	2.100	3.500	-1.427	1.253	4.167	0.286	98.87
0.8	0.21	0.021	2.103	2.629	-1.561	0.967	4.762	0.380	99.01
1	0.17	0.017	2.107	2.107	-1.772	0.745	5.882	0.475	99.20

ตารางผนวกที่ ค12 ปริมาณของสี Basic Red 46 ในน้ำสีข้อมส้งเคราะห์เมื่อถูกดูดติดผิวด้วยซีโอไลต์แบบผง

น้ำหนักซีโอไลต์ (g)	ความเข้มข้นสีข้อมที่เหลือ C(mg/l)	c (mg)	x(mg)	x/m(mg/g)	lnC	lnx/m	1/C	1/ (x/m)	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีข้อม(%)
0	29.4300	2.943	0.000						
0.1	17.6300	1.763	1.180	11.800	2.870	2.468	0.057	0.085	40.10
0.2	14.4100	1.441	1.502	7.510	2.668	2.016	0.069	0.133	51.04
0.3	11.5300	1.153	1.790	5.967	2.445	1.786	0.087	0.168	60.82
0.6	4.3700	0.437	2.506	4.177	1.475	1.430	0.229	0.239	85.15
0.8	4.2000	0.420	2.523	3.154	1.435	1.149	0.238	0.317	85.73
1	3.3900	0.339	2.604	2.604	1.221	0.957	0.295	0.384	88.48



ภาคผนวก ง

ผลการทดลองซีโอไลต์มาตรฐาน ที่ใช้ทำการเปรียบเทียบกับซีโอไลต์จากถ้ำขานอ้อย

ตารางผนวกที่ ง1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon blue โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์
มาตรฐาน 4 A ที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณซีโอไลต์(ก.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	94.88	93.62	93.47	93.99
0.2	95.23	95.51	94.93	95.22
0.3	96.35	96.02	96.47	96.28
0.4	98.77	98.09	99.04	98.63
0.5	99.11	99.12	99.64	99.29
0.6	99.03	99.03	98.78	98.95
0.8	98.99	98.95	99.21	99.05
1.0	99.29	99.20	99.21	99.23
1.5	99.46	99.12	99.04	99.21
2.0	98.68	98.60	99.12	98.80
2.5	97.91	98.26	98.35	98.17
3.0	98.08	98.04	98.14	98.09
3.5	97.86	98.17	97.41	97.82
4.0	97.30	97.23	97.24	97.26

ตารางผนวกที่ ง2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon blue โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาท.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	90.27	86.31	85.45	87.34
6	91.07	89.33	90.25	90.22
10	94.31	90.07	92.12	92.17
20	93.38	92.01	90.62	92.00
30	93.62	91.90	95.34	93.62
40	99.71	96.67	96.67	98.43

ตารางผนวกที่ ๓2 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
60	99.20	99.24	99.14	99.19
90	99.41	99.43	98.62	99.15
120	99.80	99.71	99.61	99.71
150	99.13	99.56	99.36	99.35
180	99.00	99.79	99.79	99.47
240	98.64	99.43	99.05	99.04
330	99.11	99.33	98.94	99.13
360	98.91	98.11	98.55	98.52
420	98.73	98.41	99.61	98.92

ตารางผนวกที่ ๓3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Astrazon blue โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
10	99.93	99.78	99.69	99.80
20	99.10	98.86	99.18	99.05
40	97.36	97.18	98.14	97.56
60	95.66	95.82	95.49	95.66
80	94.61	94.32	94.38	94.44
100	92.77	92.93	92.06	92.59
120	88.82	86.95	86.03	87.27
140	87.84	84.31	85.01	85.72
160	87.65	86.11	85.00	86.25
180	84.77	87.24	83.54	85.18
200	79.74	81.99	81.16	80.96

ตารางผนวกที่ ๓4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Astrazon blue โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10

พีเอช	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	16.16	17.43	16.81	16.80
3	82.25	83.07	81.45	82.26
4	93.65	94.22	93.95	93.94
5	99.94	98.30	99.14	99.12
6	97.99	98.46	98.46	98.32
7	99.03	98.93	98.93	98.95
8	99.79	99.03	99.40	99.41
9	99.14	99.40	99.40	99.35
10	99.63	98.93	99.52	99.36

ตารางผนวกที่ ๓5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Basic red 46 โดยใช้ปริมาณซีโอไลต์มาตรฐาน 4 A ที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณซีโอไลต์	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.1	40.00	38.34	39.43	39.25
0.2	50.98	48.22	46.20	48.47
0.3	52.94	50.59	49.79	51.11
0.4	66.67	67.98	68.12	67.59
0.5	68.23	69.96	68.92	69.04
0.6	75.69	74.31	74.10	74.70
0.8	81.96	78.66	76.89	79.17
1	82.35	79.45	79.28	80.36
1.5	83.92	80.24	80.07	81.41
2	83.53	80.63	79.68	81.28

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

ปริมาณซีโอไลต์	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
2.5	84.31	79.84	80.47	81.54
3	82.35	81.42	78.08	80.62
3.5	81.18	77.07	76.09	78.11
4	78.82	75.49	76.49	76.93

ตารางผนวกที่ ๖ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อม Basic red 46 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาท)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	15.02	14.62	12.79	14.14
6	25.30	22.92	25.59	24.60
10	28.06	30.43	29.59	29.36
20	34.78	36.76	33.99	35.18
30	39.92	44.66	41.99	42.19
40	49.01	46.64	48.79	48.15
60	58.50	54.94	52.80	55.41
90	60.47	55.73	58.00	58.07
120	62.05	63.64	60.80	62.16
150	70.36	72.73	70.00	71.03
180	78.26	80.24	79.20	79.23
240	80.63	81.03	80.00	80.55
330	81.03	81.82	81.60	81.48
360	80.24	80.24	81.60	80.69
420	81.82	80.63	83.20	81.88

ตารางผนวกที่ ๗7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยใช้ความเข้มข้นสีย้อมต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
10	85.47	85.05	85.26	85.26
20	84.00	83.20	82.00	83.07
40	74.71	70.73	74.92	73.45
60	71.59	72.10	69.00	70.90
80	66.60	70.42	68.99	68.67
100	73.18	70.63	70.63	71.48
120	65.47	68.03	67.39	66.96
140	67.13	66.02	66.30	66.48
160	70.64	68.81	70.64	70.03
180	71.11	69.01	70.48	70.20
200	66.00	67.52	62.40	65.31

ตารางผนวกที่ ๗8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Basic red 46 โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่ 2-10

พีเอช	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
2	22.31	20.55	15.41	19.43
3	46.22	47.04	42.69	45.31
4	64.54	66.01	62.45	64.33
5	79.68	80.63	78.26	79.52
6	85.66	83.40	80.63	83.23
7	88.45	87.75	87.35	87.85
8	87.65	86.56	88.14	87.45
9	80.88	83.00	84.58	82.82
10	78.49	79.84	82.21	80.18

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองประสิทธิภาพของซีโอไลต์ในการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอม่อฮ่อม
ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Test)

พ.ศ. ๒๕๕๖

ตารางผนวกที่ จ1 ประสิทธิภาพจากความเข้มข้นสีข้อมในระบบแบบต่อเนื่อง

ความเข้มข้นสี(มก/ล.)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
1	97.37	98.14	97.88	97.80
2	91.78	93.73	93.31	92.94
4	83.18	83.90	83.48	83.52
6	71.36	72.80	72.04	72.07

ตารางผนวกที่ จ2 ประสิทธิภาพของอัตราการไหลในระบบแบบต่อเนื่องในการบำบัดสี

อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
0.9	81.09	84.08	80.92	82.03
1.2	66.91	65.89	67.41	66.80
2.4	50.36	51.49	58.67	50.93
3.0	29.88	30.27	33.23	31.13
3.6	22.79	22.69	27.67	22.74
4.8	18.06	17.38	12.57	17.72

ตารางผนวกที่ จ3 ประสิทธิภาพการใช้เวลาการกักเก็บน้ำในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
15	79.18	78.36	71.32	76.29
30	72.64	70.78	69.43	70.95
45	63.12	58.88	57.68	59.89
60	52.42	48.33	47.33	49.36
120	36.17	35.07	34.64	35.29
180	23.87	24.79	23.82	24.16
240	23.27	23.17	21.00	22.48
300	19.70	22.90	18.18	20.26
360	15.54	15.60	16.30	15.81

ตารางผนวกที่ จ4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลซีโอไลต์บรรจุในคอลัมน์ เท่ากับ 28 กรัม
ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
5	39.61	40.12	36.13	38.62
15	23.35	27.35	24.95	25.22
30	21.02	21.76	21.76	21.52
60	17.15	16.17	20.16	17.83
120	11.73	12.98	12.18	12.30
180	3.99	5.79	3.40	4.39

ตารางผนวกที่ จ5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลของซีโอไลต์บรรจุในคอลัมน์เท่ากับ 42 กรัม ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
5	70.06	74.22	71.86	72.05
15	48.44	51.67	49.50	49.87
30	34.30	35.56	32.12	33.99
60	27.65	31.53	32.12	30.43
120	18.50	22.67	21.36	20.84
180	12.68	13.81	15.57	14.02

ตารางผนวกที่ จ6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยมวลของซีโอไลต์บรรจุในคอลัมน์เท่ากับ 56 กรัม ในระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

เวลา (นาทื)	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	0	0	0	0
5	75.22	75.03	72.61	74.29
15	66.71	69.80	65.16	67.22
30	59.74	62.84	61.29	61.29
60	57.42	56.64	55.09	56.38
120	42.70	41.16	38.83	40.90
180	18.70	21.02	21.02	20.25



ตารางผนวกที่ ๑1 ผลของปริมาณวัสดุดูดซับต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และสี Basic red 46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำ
 ฆานอ้อย(ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

ปริมาณซีโอไลต์ (กรัม)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำฆานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำฆานอ้อย	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
0.1	80.14 ^a $\pm$ 1.53	93.99 ^a $\pm$ 0.77	38.53 ^a $\pm$ 3.08	39.25 ^a $\pm$ 0.81
0.2	95.36 ^b $\pm$ 0.13	95.22 ^b $\pm$ 0.29	47.23 ^b $\pm$ 1.38	48.47 ^b $\pm$ 2.34
0.3	95.61 ^{bc} $\pm$ 0.79	96.28 ^c $\pm$ 0.23	54.15 ^c $\pm$ 2.23	51.12 ^b $\pm$ 1.64
0.4	98.86 ^{fg} $\pm$ 0.64	98.63 ^{fg} $\pm$ 0.49	67.19 ^d $\pm$ 1.12	67.59 ^c $\pm$ 0.80
0.5	99.27 ^g $\pm$ 0.25	99.29 ^h $\pm$ 0.30	69.30 ^d $\pm$ 0.92	69.04 ^c $\pm$ 0.87
0.6	98.41 ^{efg} $\pm$ 1.23	98.94 ^{gh} $\pm$ 0.14	74.90 ^e $\pm$ 0.59	74.70 ^d $\pm$ 0.86
0.8	98.24 ^{efg} $\pm$ 0.88	99.05 ^{gh} $\pm$ 0.14	80.83 ^h $\pm$ 0.86	79.17 ^{ef} $\pm$ 2.57
1.0	99.19 ^g $\pm$ 0.46	99.23 ^{gh} $\pm$ 0.04	79.97 ^{fgh} $\pm$ 0.60	80.36 ^{ef} $\pm$ 1.73
1.5	97.25 ^{cde} $\pm$ 0.79	99.21 ^{gh} $\pm$ 0.22	79.45 ^{fgh} $\pm$ 3.35	81.41 ^f $\pm$ 2.18
2.0	96.84 ^{bcd} $\pm$ 1.04	98.83 ^{gh} $\pm$ 0.28	80.50 ^{gh} $\pm$ 1.78	81.28 ^f $\pm$ 2.00
2.5	97.57 ^{defg} $\pm$ 1.31	98.17 ^{ef} $\pm$ 0.23	80.70 ^h $\pm$ 0.98	81.54 ^f $\pm$ 2.41
3.0	98.38 ^{efg} $\pm$ 0.82	98.09 ^{ef} $\pm$ 0.05	79.64 ^{fgh} $\pm$ 0.20	80.62 ^f $\pm$ 2.24

ตารางผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

ปริมาณซีโอไลต์ (กรัม)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
3.5	97.66 ^{defg} ±0.69	97.81 ^e ±0.38	76.88 ^{cf} ± 2.58	78.11 ^f ± 2.70
4.0	96.35 ^{bcd} ± 1.22	97.26 ^d ± 0.40	77.28 ^{efg} ± 1.96	76.93 ^{de} ± 1.70

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p<0.05) ตามวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ ๑๒ ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และสี Basic red 46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำ
 ฐานอ้อย(ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

เวลา (นาที)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำฐานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำฐานอ้อย	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
2	88.46 ^a $\pm$ 2.11	88.06 ^a $\pm$ 2.02	13.44 ^a $\pm$ 0.40	14.14 ^a $\pm$ 1.19
6	91.52 ^b $\pm$ 1.26	89.33 ^a $\pm$ 1.74	25.22 ^b $\pm$ 0.08	24.6 ^b $\pm$ 1.48
10	94.11 ^c $\pm$ 0.61	92.38 ^b $\pm$ 2.15	27.08 ^c $\pm$ 0.20	29.36 ^c $\pm$ 1.20
20	95.77 ^d $\pm$ 0.78	92.9 ^b $\pm$ 2.09	37.08 ^d $\pm$ 0.32	35.18 ^d $\pm$ 1.43
30	98.80 ^c $\pm$ 0.64	94.38 ^b $\pm$ 2.17	41.90 ^c $\pm$ 0.80	42.19 ^c $\pm$ 2.38
40	99.21 ^c $\pm$ 1.34	98.43 ^c $\pm$ 1.58	49.17 ^f $\pm$ 0.21	48.15 ^f $\pm$ 1.31
60	98.11 ^c $\pm$ 0.92	99.27 ^c $\pm$ 0.15	55.34 ^g $\pm$ 0.20	55.41 ^g $\pm$ 2.88
90	98.48 ^c $\pm$ 1.24	99.46 ^c $\pm$ 0.06	56.34 ^g $\pm$ 0.44	58.07 ^h $\pm$ 1.42
120	99.43 ^c $\pm$ 0.18	99.71 ^c $\pm$ 0.10	61.39 ^h $\pm$ 0.76	62.16 ⁱ $\pm$ 1.48
150	99.23 ^c $\pm$ 0.25	99.48 ^c $\pm$ 0.32	66.30 ^h $\pm$ 0.10	71.03 ⁱ $\pm$ 0.99
180	99.08 ^c $\pm$ 0.32	99.46 ^c $\pm$ 0.42	72.95 ⁱ $\pm$ 0.27	79.23 ^k $\pm$ 0.52
240	98.64 ^c $\pm$ 0.39	99.14 ^c $\pm$ 0.44	81.10 ^j $\pm$ 0.27	80.55 ^k $\pm$ 0.41

ตารางผนวกที่ ๒ (ต่อ)

เวลา (นาท)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
330	99.59 ^c ± 0.36	99.21 ^c ± 0.11	80.37 ^j ± 0.44	81.48 ^k ± 0.79
360	98.96 ^c ± 0.57	98.82 ^c ± 0.66	80.43 ^j ± 1.05	80.69 ^k ± 0.79
420	98.86 ^c ± 0.33	98.92 ^c ± 0.62	80.10 ^j ± 0.22	81.88 ^k ± 1.29

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p<0.05) ตามวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ ๓ ผลของความเข้มข้นของสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และสี Basic Red 46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จาก
 ถ้ำซานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

ความเข้มข้นสี (มก./ล.)	สี (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำซานอ้อย	Basic Red46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
10	99.74 ^c $\pm$ 0.24	99.80 ^c $\pm$ 0.12	85.24 ^c $\pm$ 0.51	85.26 ^f $\pm$ 0.21
20	99.45 ^c $\pm$ 0.61	99.05 ^{de} $\pm$ 0.17	83.77 ^c $\pm$ 1.24	83.06 ^f $\pm$ 1.00
40	98.04 ^{de} $\pm$ 0.37	97.56 ^d $\pm$ 0.51	78.45 ^d $\pm$ 2.17	73.45 ^c $\pm$ 2.36
60	97.26 ^d $\pm$ 1.09	95.66 ^c $\pm$ 0.17	71.19 ^{bc} $\pm$ 1.93	70.90 ^{de} $\pm$ 1.66
80	98.18 ^{de} $\pm$ 0.43	94.44 ^c $\pm$ 0.15	69.43 ^b $\pm$ 2.05	68.67 ^{bcd} $\pm$ 1.93
100	97.23 ^d $\pm$ 0.40	94.43 ^c $\pm$ 0.15	72.24 ^c $\pm$ 1.93	71.48 ^{de} $\pm$ 1.48
120	86.13 ^{ab} $\pm$ 0.84	87.27 ^b $\pm$ 1.42	66.64 ^a $\pm$ 1.29	66.97 ^{abc} $\pm$ 1.33
140	87.32 ^{bc} $\pm$ 0.86	85.75 ^b $\pm$ 1.85	66.15 ^a $\pm$ 0.84	66.48 ^{ab} $\pm$ 0.58
160	88.27 ^c $\pm$ 1.86	86.25 ^b $\pm$ 1.33	66.42 ^b $\pm$ 0.84	70.19 ^{cde} $\pm$ 3.00

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

ความเข้มข้นสีย้อม(มก/ล.)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอล์ได้จากเถาขานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอล์มาตรฐาน 4A	Basic Red 46 ดูดซับโดย ซีโอล์ได้จากเถาขานอ้อย	Basic Red 46 ดูดซับโดย ซีโอล์มาตรฐาน 4A
160	88.27 ^c ± 1.86	86.25 ^b ± 1.33	66.42 ^b ± 0.84	70.19 ^{cde} ± 3.00
180	87.47 ^{bc} ± 0.90	87.42 ^b ± 0.92	69.71 ^{bc} ± 1.06	70.20 ^{cde} ± 1.07
200	85.55 ^a ± 1.42	80.97 ^a ± 1.14	66.09 ^a ± 0.43	65.3 ^a ± 2.63

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p<0.05) ตามวิธี

DMRT

ตารางผนวกที่ ๑๔ ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสี Astrazon Blue และสี Basic red 46 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำ
 ชานอ้อย(ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	สีย้อม (dyes)			
	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำชานอ้อย	Astrazon blue ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A	Basic Red 46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์จากถ้ำชานอ้อย	Basic Red 46 ดูดซับโดย ซีโอไลต์มาตรฐาน 4A
2	16.27 ^a $\pm$ 1.09	16.80 ^a $\pm$ 0.64	15.09 ^a $\pm$ 1.58	19.42 ^a $\pm$ 3.59
3	83.27 ^b $\pm$ 1.77	82.26 ^b $\pm$ 0.81	52.82 ^b $\pm$ 1.94	45.32 ^b $\pm$ 2.31
4	98.88 ^c $\pm$ 1.12	93.94 ^c $\pm$ 0.29	86.99 ^d $\pm$ 1.24	64.33 ^c $\pm$ 1.78
5	98.94 ^c $\pm$ 0.82	99.13 ^d $\pm$ 0.82	90.91 ^h $\pm$ 0.40	79.52 ^d $\pm$ 1.19
6	99.43 ^c $\pm$ 0.82	98.30 ^d $\pm$ 0.27	87.74 ^d $\pm$ 0.63	83.23 ^d $\pm$ 2.52
7	99.51 ^c $\pm$ 0.52	98.95 ^d $\pm$ 0.07	88.68 ^{de} $\pm$ 0.77	87.85 ^e $\pm$ 0.60
8	98.86 ^c $\pm$ 0.84	99.41 ^d $\pm$ 0.38	89.57 ^{fg} $\pm$ 0.24	87.45 ^e $\pm$ 0.80
9	99.71 ^c $\pm$ 0.23	99.31 ^d $\pm$ 0.15	90.17 ^{fg} $\pm$ 0.21	82.82 ^d $\pm$ 1.86
10	99.59 ^c $\pm$ 0.04	99.36 ^d $\pm$ 0.38	83.27 ^c $\pm$ 0.13	80.18 ^d $\pm$ 1.88

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ตามวิธี
 DMRT

ตารางผนวกที่ ๓5 ผลของค่าความเข้มข้นของสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้
ซีโอไลต์จากเถาวัลย์ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

ความเข้มข้นของสี (มก./ล.)	สี (dyes)
	สีสังเคราะห์จากโรงงาน
1	97.8 ^d $\pm$ 0.39
2	92.94 ^c $\pm$ 1.03
4	83.52 ^b $\pm$ 0.36
6	72.07 ^a $\pm$ 0.72

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ ๓6 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์
จากเถาวัลย์ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	สี (dyes)
	สีสังเคราะห์จากโรงงาน
0.9	82.03 ^f $\pm$ 1.78
1.2	66.74 ^c $\pm$ 0.77
2.4	50.93 ^d $\pm$ 0.79
3.0	31.13 ^c $\pm$ 1.83
3.6	22.74 ^b $\pm$ 0.07
4.8	16.00 ^a $\pm$ 2.99

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ ๗ ผลของเวลาในการกักเก็บน้ำสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

เวลา (นาทีก)	สีข้อม (dyes)
	สีสังเคราะห์จากโรงงาน
15	78.77 ^b $\pm$ 0.58
30	70.95 ^g $\pm$ 1.61
45	58.28 ^f $\pm$ 0.85
60	49.36 ^e $\pm$ 2.70
120	35.29 ^d $\pm$ 0.79
180	24.16 ^c $\pm$ 0.55
240	22.48 ^{bc} $\pm$ 1.28
300	20.26 ^b $\pm$ 2.41
360	15.81 ^a $\pm$ 0.42

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ ๘ ผลของมวลของซีโอไลต์ที่บรรจุในคอลัมน์และระยะเวลาการกักเก็บน้ำสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.)

เวลา (นาทีก)	มวลของซีโอไลต์ที่บรรจุลงในคอลัมน์		
	28 กรัม	42 กรัม	56 กรัม
5	38.62 ^f $\pm$ 2.17	72.05 ^f $\pm$ 2.09	74.29 ^f $\pm$ 1.46
15	25.22 ^c $\pm$ 2.01	49.87 ^c $\pm$ 1.65	67.22 ^c $\pm$ 2.36
30	21.51 ^d $\pm$ 0.43	33.99 ^d $\pm$ 1.74	61.29 ^d $\pm$ 1.55
60	17.83 ^c $\pm$ 2.08	30.45 ^c $\pm$ 2.43	56.38 ^c $\pm$ 1.19
120	12.30 ^b $\pm$ 0.63	20.84 ^b $\pm$ 2.13	40.90 ^b $\pm$ 1.15
180	4.39 ^a $\pm$ 1.25	14.02 ^a $\pm$ 1.46	20.25 ^a $\pm$ 1.34

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ตามวิธี DMRT

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวศรียาภา บุญเพชร
เกิดวันที่	3 มกราคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอตะพานหิน จังหวัดพิจิตร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนภาคีบัณฑิตจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง ประเทศไทย (วว.)

